

Jarno Kangasniemi

# Ford 302 -moottorin simulointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

6.5.2013

Tekijä Otsikko	Jarno Kangasniemi Ford 302 -moottorin simulointi
Sivumäärä Aika	76 sivua 6.5.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja	Projekti-insinööri Harri Miinin
<p>Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin simulointiohjelmistoon ja simuloitiin sen avulla Ford Racingin 302 -moottori. Simulointiohjelmistona käytettiin moottoreiden ja ajoneuvojen simuloimiseen tarkoitettua Gamma Technologiesin GT-Suitea. Ohjelmisto koostuu eri moduuleista, joista moottorin suorituskyvyn simuloimiseen käytetään GT-Poweria.</p> <p>Työn tavoitteena oli rakentaa toimiva simulointimalli Ford 302 -moottorista ja verrata siitä saatuja simulointituloksia moottoridynamometristä saatuihin suorituskykyarvoihin. Tavoitteena oli myös simuloinnin avulla parantaa moottorin suorituskykyä optimoimalla siihen uusi nokka-akseli moottorin huipputehon kasvattamiseksi.</p> <p>Koska käytetty simulointiohjelmisto on hyvin monimutkainen ja laaja, työn alussa selvitetään ohjelmiston perusrakennetta ja toimintaa. Seuraavaksi käsitellään simulointimallin rakentamisessa huomioitavia yleisiä ohjeita ja suosituksia.</p> <p>Lisäksi työssä ohjeistetaan simulointimallin korreloimista todellisen moottoriin kanssa sekä tarkastellaan kalibrointimenetelmiä. Lopuksi käydään läpi Ford 302 -moottorin simulointimallin rakenne ja kuvataan optimointityökalun käyttämistä nokka-akselin optimoinnissa sekä analysoidaan simuloinnin tuloksia.</p> <p>Opinnäytetyö antaa perustiedot ohjelman perusrakenteesta, laskentakokonaisuudesta ja yleisistä ohjeista. Työn kirjallisen tuotoksen tarkoituksena on myös toimia Metropolia Ammattikorkeakoulun oppaana tulevissa simulointisovelluksissa.</p>	
Avainsanat	GT-Suite, GT-Power, moottori, simulointi

Author Title	Jarno Kangasniemi Ford 302 Engine Simulation
Number of Pages Date	76 pages 6 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor	Harri Miinin, Project Engineer
<p>This bachelor's thesis introduces simulation software to simulate Ford Racing 302 engine. The software in use is Gamma Technology's GT-Suite which is utilized for various engine and vehicle simulation applications. The software consists of several modules used to model and simulate different systems. The thesis uses GT-Power for engine performance simulations.</p> <p>The goal was to build a working simulation model of the Ford 302 engine and compare the performance results from the simulation with values obtained from engine dynamometer. The aim was also to improve the engine's performance by optimizing a new camshaft to increase maximum power.</p> <p>The beginning of the study goes through the software structure and function due to the complexity and extensiveness of the simulation software in use. Following is an explanation of common simulation model constructions and general recommendations.</p> <p>In addition the study illustrates ways to correlate and calibrate a simulation model with the actual engine. The end of the thesis focuses on the build of the simulated Ford 302 engine and also the optimization tool is described. An optimizer was used to optimize the engine's camshaft and all simulated results are analyzed.</p> <p>The thesis provides basic knowledge about the program's structure, simulation solver and the general instructions. This thesis is also intended to act as a guideline for future simulation applications at the Metropolia University of applied sciences.</p>	
Keywords	GT-Suite, GT-Power, engine, simulation

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Ohjelmisto	2
2.1	GT-Power	2
2.2	GT-Ise	2
2.2.1	Ohjelmiston rakenne	3
2.2.2	Sapluunat	4
2.2.3	Objektit	4
2.2.4	Osat	5
2.3	GT-Post	5
2.4	Gem3D	6
3	Ohjelman toiminta	7
3.1	Virtauksen laskenta	7
3.2	Aikajaksot	9
3.3	Diskretisointi	10
3.4	Laskenta käytännössä	11
4	Yleisiä ohjeita simulointimallien rakentamiseen	12
4.1	Lähtötiedot	12
4.2	Linkitys	12
4.3	Putket	12
4.3.1	Kitkakerroin	13
4.3.2	Painehäviökerroin	13
4.3.3	Lämmönsiirtokerroin	14
4.4	Virtauksen jakaminen	14
4.5	Seinämän lämpötilan laskuri	17
4.6	Imu- ja pakokanavat	18
4.7	Osien väliset yhteydet	19
4.8	Venttiilit	20
4.9	Sylinteri	21
4.9.1	Lämmönsiirto	21
4.9.2	Palaminen	21
4.10	Polttoaineen ruiskutus	22

4.11	Kitka- ja apulaitehäviöt	23
5	Simulointimallin ja mittausdatan korreloiminen	25
5.1	Kirjoitus- ja yksikkövirheet	25
5.2	Kertoimien oikea käyttö	26
5.3	Korreloimiseen tarvittava mittausdata	26
6	Kalibrointimenetelmä	27
6.1	Imusarjan paineen kalibroiminen	27
6.2	Volymetrinen hyötysuhde	28
6.2.1	Volymetrisen hyötysuhteen kalibroiminen	28
6.2.2	Lämmönsiirron vaikutus	29
6.2.3	Venttiili tapahtumien vaikutus	29
6.3	Putkiston vastapaineen kalibroiminen	30
6.4	Sylinteripaineen kalibroiminen	30
6.5	Pakokaasun lämpötilan kalibroiminen	31
6.6	Moottorin kitkojen ja apulaitehäviöiden kalibroiminen	32
7	Ford 302 -moottorin simulaatiomalli	34
7.1	Imupuoli	34
7.1.1	Alkuympäristön mallinnus	34
7.1.2	Alkuympäristön ja imutorven liitos	36
7.1.3	Imutorvi	36
7.1.4	Imusarja	37
7.1.5	Imusarjan ja -putken liitos	40
7.1.6	Imuputki	41
7.1.7	Imukanava	43
7.2	Polttoaineen ruiskutus	44
7.2.1	Määrä	44
7.2.2	Ajoitus	45
7.3	Imuventtiili	46
7.3.1	Päävalikko	47
7.3.2	Lisävalikko	47
7.3.3	Venttiilin nosto	48
7.3.4	Virtausarvot	49
7.4	Sylinteri	50
7.4.1	EngCylTWall	51
7.4.2	WoschniGT	52

7.4.3	SIWiebe	53
7.5	Pakoventtiili	54
7.6	Pakopuoli	55
7.6.1	Pakokanava	55
7.6.2	Pakokanavan ja primäärin liitäntä	57
7.6.3	Primäärit	58
7.6.4	Kollektori	61
7.6.5	Pakoputki	62
7.6.6	Yhdysputki	63
7.6.7	Loppuympäristön mallinnus	64
7.7	Kampikoneisto	65
7.7.1	Kitka	66
7.7.2	Geometria	67
7.7.3	Sytytysjärjestys	68
8	Optimointi	70
8.1	DOE	70
8.2	Suora optimointi	70
8.3	Nokka-akselin optimointi	72
9	Tulokset	72
9.1	Simulointi	72
9.2	Optimointi	73
10	Yhteenveto	75
	Lähteet	77

## 1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö käsittelee Ford 302 -moottorin simulointia tietokoneohjelman avulla. Simulointiohjelmistona käytetään teollisuustason standardit täyttävää GT-Suitea, joka on johtava moottorin ja voimansiirron kokonaisvaltainen simulointiympäristö.

Tavoitteena on rakentaa todellisesta moottorista simulointiympäristössä toimiva versio, jolloin moottoriin mahdollisesti tehtävien muutosten tutkiminen olisi jatkossa helpompaa ilman todellisen moottorin kanssa tehtävää testityötä. Työn tarkoituksena on myös toimia tietolähteenä tulevien simulointisovellusten tekemisessä.

Työssä käsitellään simulointiympäristön perusrakennetta, laskennan toimintaa, simuloimiseen liittyviä yleisiä ohjeita, korrelointia, kalibrointimenetelmiä, optimointia sekä simuloinnista saatuja tuloksia.

Optimoinnissa tutkittava kohde oli moottorin nokka-akseli, joka haluttiin optimoida uusiin sylinterikansien paremman virtaavuuden takia. Tavoitteena oli kasvattaa moottorin tehoa korkealla kierrosalueella.

Ohjelman perusteet opeteltiin Gamma Technologiesin järjestämässä koulutuksessa Italian Modenassa huhtikuussa 2012. Koulutuksen jälkeen simuloitavasta moottorista alettiin selvittää ja mitata simuloimiseen tarvittavia tietoja. Selvitystyön jälkeen opeteltiin edelleen ohjelman käyttöä kurssiharjoitusten avulla ohjelman laajuuden ja monimutkaisuuden takia. Ford 302 -moottorin simulointimallia rakennettiin kesän 2012 ja kevään 2013 välisenä aikana.

Työn kirjallisen osuuden perustana käytetään ohjelmiston manuaaleja (1), ohjevalikkoa sekä koulutuksessa ja simuloinnin yhteydessä opittuja asioita.

## 2 Ohjelmisto

Työssä käytettävä ohjelmisto on GT-Suite, joka on Gamma Technologiesin tarjoama kokonaisvaltainen moottoreiden ja ajoneuvojen simulointiohjelmisto. GT-Suite koostuu eri moduulista, joita ovat: GT-Ise, GT-Post, Doe, Doe-Post, Gem3D, Cool-3D ja VT-Design. Ohjelmiston osat mahdollistavat simulaatioiden tekemisen auton ja moottorin eri järjestelmissä. Ohjelmien avulla simuloidut osat voidaan liittää keskenään yhteen, jolloin simulaatiomalleista voidaan tarvittaessa tehdä erittäin tarkkoja ja yksityiskohtaisia.

Tässä työssä käytetään moottorin suorituskyvyn, akustiikan ja pakokaasujen jälkikäsittelyn analysointiin tarkoitettua GT-Poweria, simulaatioiden tuloksien analysointiin tarkoitettua GT-Postia sekä Gem3D:tä, jolla 3D-CAD-malleista voidaan muuntaa GT-Suitessa käytettäviä komponentteja.

### 2.1 GT-Power

GT-Power on erittäin monipuolinen erilaisten moottoreiden tutkimus- ja kehitystyöhön käytettävä analysointiohjelmisto. Ohjelmiston toiminta perustuu yksiulotteisen nestevirtauksen laskemiseen eri yhtälöihin avulla moottorin imu- ja pakopuolella. Sylinterin sisäisten prosessien kuten lämmönsiirron, paineen ja palamisen mallintamiseen on valittavana useita erilaisia laskentamalleja.

Ohjelmistoa käytettiin tässä työssä moottorin suorituskyvyn tutkimiseen ja optimointiin. Imu- ja pakoventtiilien ajoituksen sekä nokka-akselin profiilin optimointiin käytettiin ohjelmiston omaa optimointityökalua.

### 2.2 GT-Ise

GT-Ise (Integrated Simulation Environment) on ohjelmiston käyttöliittymä, jossa varsinainen simulointimalli rakennetaan, simuloinnin asetukset määritetään ja simulointi

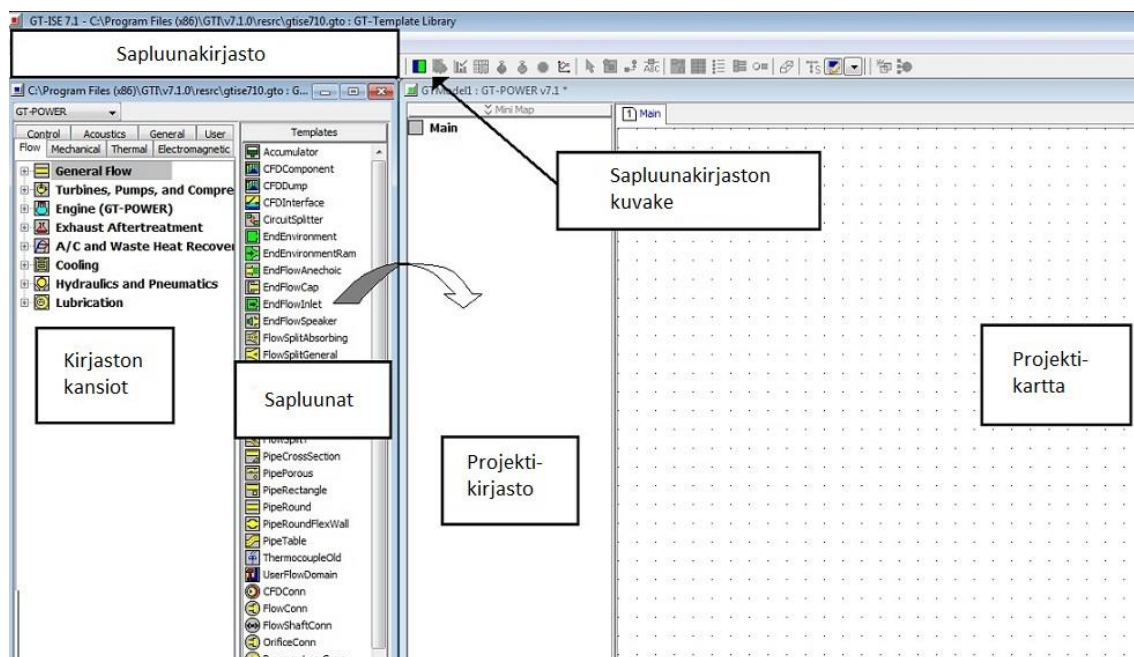


voidaan käynnistää. GT-Ise toimii 2D-ympäristössä, joka koostuu sapluunakirjastosta, projektikirjastosta ja projektikartasta.

### 2.2.1 Ohjelmiston rakenne

Sapluunakirjaston kansioista etsitään simulointimallin rakentamiseen tarvittavat sapluunat, jotka ovat jaettu eri ominaisuuksien mukaan eri kansioihin. Esimerkiksi virtaukseen liittyvät ja mekaaniset osat ovat omissa kansioissaan. Valitut sapluunat siirretään projektikirjastoon objektien luomista varten. Siirrettäessä objektit projektikartalle, muodostuu niistä osia. Osat linkitetään yhtenäiseksi simulointimalliksi ja simulointi voidaan aloittaa. Ohjelmassa käytetään olioperustaista rakennetta, jossa on käytössä kolmitasoinen hierarkia. Hierarkian muodostavat sapluunat, objektit ja osat.

Ohjelmassa on mahdollista käyttää myös velho toimintoa, jonka avulla ohjelma sijoittaa valmiiksi projektikirjastoon sapluunat, joita yleisimmin käytetään eri moottorimallien rakentamisessa. Ohjelman perusrakenteen selventämiseksi kuvassa 1 esitetään GT-Ise käyttöliittymän rakennetta tyhjän tiedoston avulla.



Kuva 1. GT-ISE:n käyttöliittymä.

### 2.2.2 Sapluunat

Sapluunat, jotka löytyvät sapluunakirjastosta ovat ohjelman valmiina tarjoamia täyttämättömiä tai esitäytettyjä mallipohjia. Sapluunoiden esitäytettyjä kohtien merkitään ohjelma käyttää lyhenteitä def (default) ja ign (ignored). Def tarkoittaa, että ohjelma käyttää laskentaan omia oletusarvoja. Ign merkitsee, että ohjelma ei ota kyseistä kohtaa ollenkaan huomioon. Sapluunaa ei voi myöskään muokata ennen kuin se on siirretty projektikirjastoon. Tiettyjä objekteja luotaessa on kuitenkin syytä olla tarkkana esitäytettyjen kohtien kanssa, koska niihin saattaa tarvita tehdä muutoksia.

### 2.2.3 Objektit

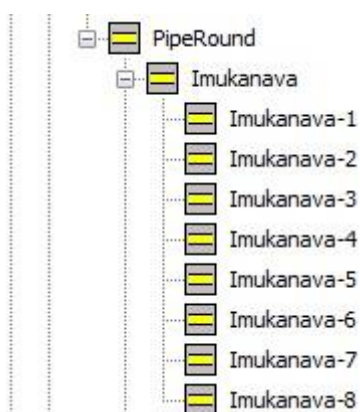
Siirrettäessä sapluunat projektikirjastoon niistä voidaan muodostaa objekteja syöttämällä niihin vaadittavat tiedot, eli kohdat jotka ovat tyhjinä. Ohjelmassa on käytössä kolme erilaista objektia: komponentti-, yhteys- ja referenssiobjekti. Komponenttiobjektit kuvaavat mallin fyysisiä asioita. Yhteysobjekteja ovat komponenttiobjektien liitoksia kuvaavia objekteja, jolla voidaan vaikuttaa esimerkiksi virtauksen tehokkuuteen. Referenssiobjektit sisältävät informaatiota mitä komponenttiobjektit käyttävät, kuten imupuolen läpi sylinteriin virtaavan aineen koostumuksen. Kuvasta 2 nähdään EndEnvironment-komponenttiobjektin luomiseen vaadittavat tiedot, joita ovat objektin nimen lisäksi absoluuttinen paine (Pressure), lämpötila (Temperature) ja virtaavan aineen koostumus (Composition), jossa käytetään mallinnuksessa käytettävää referenssiobjektia.

Attribute	Unit	Object Value
Pressure (Absolute)	bar	
Temperature	K	
Pressure Flag		standard(total)
Composition		

Kuva 2. Esimerkki EndEnvironment-objektin luomisesta.

### 2.2.4 Osat

Osia syntyy kun objekteja siirretään projektikartalle, jolloin ne kuvaavat moottorin fyysisiä osia. Kuvassa 3 voidaan havaita imukanavan mallintamiseen käytetyn PipeRound-sapluunan alle muodostunut Imukanava-objekti. Imukanava-objekteja on siirretty projektikartalle kahdeksan kappaletta, jolloin niistä on muodostunut kuvasta nähtävät 8 osaa. Tehtäessä muutoksia Imukanava-objektiin, tulevat samat muutokset voimaan hierarkian mukaisesti myös kaikissa kahdeksassa osassa, jolloin niitä ei tarvitse yksitellen muokata ja muutoksien tekeminen on näin ollen nopeampaa.



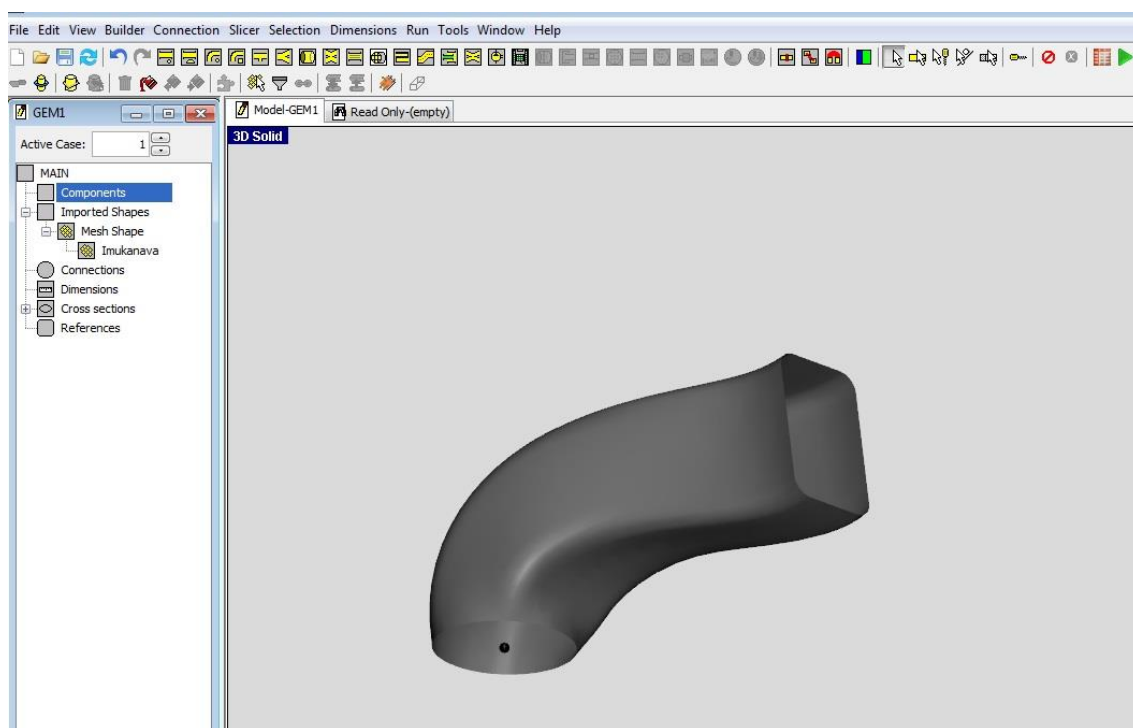
Kuva 3. Imukanavan rakennepuu.

## 2.3 GT-Post

GT-Post on tehokas tietojen analysointiväline, jonka avulla voidaan tarkastella ja käsitellä simuloimisesta syntyviä tuloksia. Ohjelman avulla voidaan tuloksia tarkastella 2D ja 3D muodossa sekä käyttämällä animaatioita. Ohjelma tarjoaa myös mahdollisuuden yhdistää tuloksia eri simulointien välillä. Tuloksia eri simulointikertojen välillä voidaan luoda komennolla "Create plots of RLT's". Ohjelmaan on myös mahdollista tuoda todellisesta moottorista mitattua dataa ja verrata sitä simuloinnin avulla saatujen tuloksien kanssa suoraan ohjelmassa. RLT-viewer on yksi GT-Postin hyödyllinen ominaisuus, jossa mallia kuvataan eri värien avulla. Värit edustavat valittujen ominaisuuksien suuruutta kuten painetta, lämpötilaa ja tiheyttä, jolloin mallista saadaan nopeasti tehtyä yleiskatsaus, esimerkiksi virtaushäviöitä aiheuttavan osan paikallistamiseksi.

## 2.4 Gem3D

Gem3D on graafinen 3D-ohjelma, jota käytetään virtausjärjestelmien rakentamisessa. Ohjelman avulla valmiit 3D-mallit muunnetaan virtauskomponenteiksi, jonka jälkeen ne voidaan myös avata suoraan GT-Ise-ympäristössä. Tämä mahdollistaa tarkempien virtausjärjestelmien luomisen, kuin käyttämällä pelkästään ohjelman valmiita virtauskomponenttien mallipohjia. Ohjelman avulla voidaan rakentaa mitä vain virtauksen komponentteja kuten imu- ja pakosarjoja, äänenvaimentimia ja putkia. Tässä työssä Gem3D:tä käytettiin apuna lähes kaikkien virtauskomponenttien mallintamisessa. Kuvas-  
sassa 4 havainnollistetaan Gem3D-ohjelman rakennetta Catia V5 -ohjelmistolla mallinnetun imukanavan avulla.



Kuva 4. Imukanavan mallintaminen.

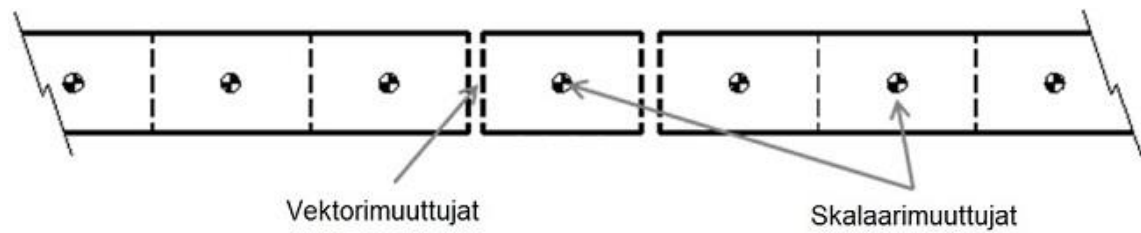
### 3 Ohjelman toiminta

Ohjelman toiminta perustuu yksiulotteisen nestevirtauksen yhtälöihin moottorin imu- ja pakopuolella. Mallin jokainen fyysinen virtauskomponentti jaetaan useaan pienempään tilavuuteen, joita yhdistävät rajapinnat (ks. 3.3 Diskretisointi). Sylinterin sisäisten asioiden simulointiin on käytössä erilaisia ratkaisumalleja, jotka tarjoavat vaihtoehtoja tasapainon löytämiseksi mallin monimutkaisuuden ja tarkkuuden välillä ottaen huomioon käytettävissä olevat lähtötiedot. Jokainen moottorisykli on jaettu useisiin pieniin aikajaksoihin (Time steps).

Ohjelmassa on valittavana kaksi aikaintegraatiomenetelmää, jotka ovat implisiittinen ja eksplisiittinen menetelmä. Integraatiomenetelmillä on merkitystä ratkaistaviin muuttujiin ja aikajaksojen rajoituksiin. Eksplisiittisen menetelmän ensisijaisia muuttujia ovat massavirta, tiheys ja sisäenergia. Tässä työssä käytetään moottorin suorituskyvyn analysoimiseen tarkoitettua eksplisiittistä integraatiomenetelmää, koska se soveltuu paremmin epävakaa virtauksen laskemiseen painepulssien esiintyessä moottorin virtauskomponenteissa. Painepulsseilla on suuri vaikutus moottorin suorituskykyyn, koska ne vaikuttavat keskeisesti moottorin kaasunvaihtoon.

#### 3.1 Virtauksen laskenta

Virtauksen laskenta perustuu Navier–Stokesin yhtälöihin, joita käytetään kaasujen ja nesteiden liikkeen kuvaamiseen. Ohjelma laskee jokaisella aikajaksolla yhtäjaksoisesti kolme eri yhtälöä. Nämä yhtälöt ovat massan jatkuvuusyhtälö (kaava 1), energian säilymlaki (kaava 2) ja liikemäärän säilymlaki (kaava 3). Kun virtauskomponentti on jaettu useisiin pieniin tilavuuksiin, ratkaistaan tilavuuksien rajapinnoilla vektorimuuttujat, kuten nopeus ja massavuo. Skalaarimuuttujat kuten paine, lämpötila, tiheys, sisäinen energia ja entalpia ratkaistaan jokaisen jaetun tilavuuden keskipisteessä ja sen oletetaan pysyvän samankaltaisena läpi koko tilavuuden. Skalaari- ja vektorimuuttujia sijaintia putkessa havainnollistetaan kuvassa 5.



Kuva 5. Skalaari- ja vektorimuuttujat virtauskomponentin jaetuissa tilavuuksissa.

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \sum_{boundaries} \dot{m} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta(m e)}{\Delta t} = -p \frac{\Delta V}{\Delta t} + \sum_{boundaries} (\dot{m} H) - h A_s (T_{fluid} - T_{wall}) \quad (2)$$

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\Delta t} = \frac{\Delta p A + \sum_{boundaries} (\dot{m} u) - 4 C_f \frac{\rho u |u| \Delta x A}{2 D} - C_p \left( \frac{1}{2} \rho u |u| \right) A}{\Delta x} \quad (3)$$

$\dot{m}$  = massavirta rajapinnalla,  $\dot{m} = \rho A u$  [kg/s]

$m$  = ilman massa tilavuudessa [kg]

$V$  = tilavuus [ $\text{m}^3$ ]

$p$  = paine [Pa]

$\rho$  = tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$A$  = virtauksen poikkipinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$A_s$  = lämmönsiirtoalueen pinta-ala [ $m^2$ ]

$H$  = kokonaisentalpia [J]

$h$  = lämmönsiirtokerroin

$T_f$  = nesteen lämpötila [K]

$T_w$  = seinämän lämpötila [K]

$C_p$  = painehäviökerroin

$D$  = halkaisija [m]

$\Delta x$  = elementin pituus virtauksen suunnassa (diskretisointi pituus) [m]

$\Delta p$  = paine-ero  $\Delta x$ :n yli [Pa]

### 3.2 Aikajaksot

GT-Powerin ratkaisija käyttää simuloinneissa suoraan laskettua arvoa eikä iteroimalla saatua tulosta, kuten 3D virtauslaskennassa. Ratkaisu perustuu järjestelmän tilaan ajanhetkellä  $t_0$ , jossa lasketaan uusi aika  $t_1$ , käyttäen kolmea aiemmin esitettyä yhtälöä. Jotta laskentaratkaisu olisi oikea ja laskenta pysyisi riittävän vakaana, täytyy  $t_1$ :n olla tarpeeksi lähellä hetkeä  $t_0$ :lla.  $t_0$ :n ja  $t_1$ :n välinen maksimiaikajakso lasketaan uudestaan jokaisen aikajakson alkaessa. Aikajakson ja diskretisoinnin pituuden suhde määräytyy Courant-arvolla, joka saa olla korkeintaan 0,8. Ratkaisija pysyy vakaana kun Courant-ehto täyttyy (kaavat 4 ja 5).

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} (|u| + c) \leq 0,8m \quad (4)$$

$$\Delta t \propto \frac{\rho V}{\rho A_{eff} c} \quad (5)$$

$\Delta t$  = aikajakso [s]

$\Delta x$  = diskretisointi pituus [m]

$u$  = nesteen nopeus [m/s]

$c$  = äänen nopeus [m/s]

$m$  = aikajaksokerroin  $\leq 1$

$\rho$  = tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$A_{eff}$  = Virtauksen poikkipinta-ala [m<sup>2</sup>]

### 3.3 Diskretisointi

Diskretisointi on mallin fyysisten osien jakamista useaan pieneen tilavuuteen simulointitulosten tarkkuuden parantamiseksi. Diskretisointi tapahtuu käytännössä kahdessa vaiheessa, joista ensimmäisessä moottori jaetaan manuaalisesti virtausobjekteiksi. Toisessa vaiheessa virtausobjektit jaetaan ohjelman toimesta vielä useisiin pienempiin tilavuuksiin, jonka suuruus määritetään syöttämällä arvo virtausobjektin valikon kohtaan diskretisoinnin pituus (Discretization lenght). Käytettäessä pieniä tilavuuksia, simulointimallin tarkkuus paranee, mutta laskenta-aika pitenee. Tästä syystä osia on aiheetonta jakaa liian pieniin tilavuuksiin, koska tietyn rajan ylittämisen jälkeen tulosten tarkkuus ei enää kasva, jolloin laskenta-aika pitenee turhaan.

Diskretisoinnin pituus tarkoittaa myös simulointimallissa käytettävien osien kannalta sitä, että se on mitoitettavien osien minimipituus. Osien tulisi myös olla mahdollisimman lähellä jaollisia käytettävällä diskretisointipituudella. Moottorien fyysistä rakenteista joh-



tuen tämä sääntö saattaa olla tiettyjen osien kohdalla vaikea toteuttaa, jolloin diskretisointipituutta lyhyemmät osat lisätään seuraavaan osan pituuteen.

Moottorin suorituskyvyn analysointia tehtäessä suositeltava diskretisoinnin pituus on imupuolella 40 % ja pakopuolella 55 % moottorin sylinterin halkaisijasta. Käytettävien diskretisointipituuksien erot johtuvat äänen nopeuden muuttumisesta imu- ja pakopuolella lämpötilan vaikutuksesta. Diskretisoinnin pituutena tulisi käyttää puolta suositelluista arvoista jos tutkitaan korkeakierroksista moottoria, jonka analysointi sijoittuu yli 6000 kierrosta minuutissa olevalle alueelle tai akustisia analyysejä tehtäessä.

### 3.4 Laskenta käytännössä

Simulointi perustuu samankaltaisiin fysikaalisiin prosesseihin ja vaiheisiin kuin oikean-kin moottorin toiminta. Virtaus moottorin imu- ja pakopuolella saadaan laskemalla käyttäen nestevirtauksen kaavoja. Virtauslaskelmien jälkeen ohjelma ennustaa moottorin sylinterissä olevan ilman ja polttoaineen määrän imuventtiilin sulkeuduttua. Kemiallisen tasapainon yhtälöitä käytetään määrittämään, paljonko lämpöä seoksesta vapautuu sen palamisen aikana. Käytetyn lämmönsiirtomallin mukaisesti saadaan laskettua palamisprosessin aikana vapautuvan energian määrä ja paineen aleneminen. Paineprofiliista saadaan laskettua moottorin tuottama tehollinen keskipaine.

## 4 Yleisiä ohjeita simulointimallien rakentamiseen

### 4.1 Lähtötiedot

Lähdettäessä tekemään moottorin simulointimallia on kerättävä riittävästi tietoa simuloitavasta moottorista, koska se helpottaa myöhemmin tehtävää simulaation kalibroimista. Pakollisia perustietoja ovat moottorin sytytysjärjestys, puristussuhde sekä virtauskomponenttien mitat kuten pituus, sisähalkaisijat sekä haaraumakohtien tilavuudet. Lisäksi sylinterin geometria, kuten halkaisija, iskunpituus, kiertokangen pituus, ovat pakollisia perustietoja. Myös nokka-akselin profiili, venttiilien ajoitukset, venttiilivällys ja sylinterikannen virtausarvot tulee selvittää ennen simulointimallin rakentamisen aloittamista. Sylinterin lämmönsiirron laskemiseen tarvitaan männän pinnan ja palotilan pinta-ala sekä sylinterin seinämän yläpinnan ja männän yläpinnan välinen välys männän ollessa yläkuolokohdassa.

### 4.2 Linkitys

Linkitettäessä virtauskomponentteja toisiinsa luodaan virtauksen kulkusuunta. Virtaus-suunta on helppo tarkastaa nuolista tai numeroista, jotka määrittävät osan sisääntulo ja ulostuloportit. Linkityksessä kannattaa olla tarkkana, koska jos sisään ja ulostulon halkaisijat ovat erikokoiset ja linkitys tehdään väärään suuntaan, käyttää ohjelma virtauksen laskemiseen vääriä arvoja. Linkityksessä tulee käyttää erityistä huomiota linkitettäessä virtauksenjakamiskomponenttia muihin virtauskomponentteihin, jotta jakamiskomponenttien asetuksissa määritetyt porttien suhteet toisiinsa nähden määräytyvät mallissa suunnitellulla tavalla.

### 4.3 Putket

Putket ovat yleisin käytetty virtauskomponenttien mallinnukseen käytettävä osa, jonka avulla voidaan mallintaa erimuotoisia, kuten suoraa, suippoja ja käyriä putkia. Putket ovat oletusarvoisesti pyöreitä, mutta valittavana on myös suorakulmainen malli. Muiden geometrinen muotojen vaikutuksien mallintamiseen putkissa käytetään kitkakerrointa

(friction multiplier), lämmönsiirtokerrointa (heat-transfer multiplier) ja painehäviökerrointa (pressure loss coefficient).

#### 4.3.1 Kitkakerroin

Kitkakertoimella kuvataan virtaushäviöitä putkissa kitkan vaikutuksesta putken seinästä. Valittavana on useiden erilaisten materiaalien valmiita pinnanlaatuja ja haluttaessa voidaan myös määritellä oma pinnanlaadun arvo. Materiaalin valinta siis ei tarkoita, että kyseinen osa olisi tehty käyttämällä valittua materiaalia, joten materiaalia valittaessa ei tarvitse ottaa huomioon osan sijaintia, kuten esimerkiksi materiaalin kesto- korkean lämpötilan vaikutuksesta.

#### 4.3.2 Painehäviökerroin

Painehäviökerroin lasketaan komponentissa virtauksen molempiin suuntiin. Painehäviöitä putkissa aiheuttavat erilaiset muodot, kuten kartiomaiset osuudet ja mutkat. Käytettäessä oletusarvoa (def), ohjelma laskee putken muodoista aiheutuvat painehäviöt kaavalla 6.

$$C_p = \frac{p_1 - p_2}{\frac{1}{2} \rho V_1^2}$$

6

$C_p$  = Painehäviökerroin

$p_1$  = sisääntulon paine

$p_2$  = ulostulon paine

$\rho$  = ilman tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]

$V_1$  = sisääntulon virtausnopeus [m/s]

#### 4.3.3 Lämmönsiirtokerroin

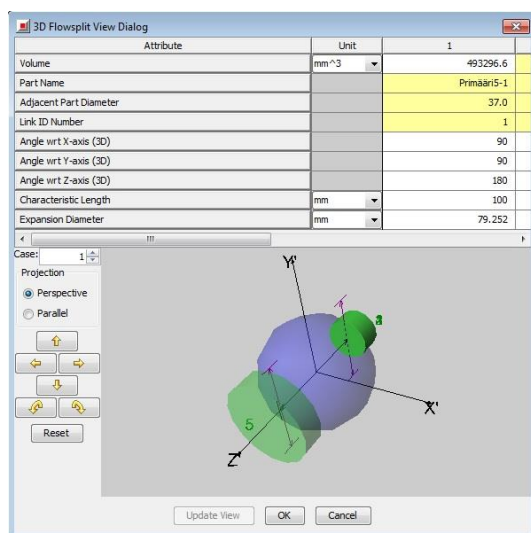
Lämmönsiirtokerrointa käytetään kuvaamaan lämmönsiirtymistä putkien seinämiin virtaavan aineen lämpötilan vaikutuksesta. Lämmönsiirto lasketaan jokaisella aikajaksolla, jossa muuttujina ovat nesteen nopeus, nesteen termiset ominaisuudet ja putken pinnanlaatu. Lämmönsiirtokertoimella voidaan vaikuttaa, jokaisen yksittäisen osan lämmönsiirron laskemiseen, mutta valittavana on myös kerroin, jolla voidaan vaikuttaa kaikkien osien lämmönsiirron laskemiseen kerralla (Global Heat Transfer Multiplier).

#### 4.4 Virtauksen jakaminen

Virtauksen jako-osa (flowsplit) on virtauskomponentti, jota käytetään virtauksen jakokohdissa. Jako-osan avulla voidaan mallintaa esimerkiksi imusarja, jossa virtaus pitää jakaa sylintereiden imuputkille. Virtauksen laskeminen perustuu yksiulotteisen virtauksen yhtälöiden soveltamiseen kolmiulotteiseen virtaukseen, joten tulokset eivät välttämättä aina ole täydellisiä.

Skalaarimuuttujat ratkaistaan haaraumakohdan tilavuuden keskikohdassa, ja liikemäärän yhtälöiden avulla lasketaan virtaus erikseen jokaisten ulostulojen eli porttien kohdissa. Virtauksen laskemiseksi porteissa, tarvitsee jakokomponenteissa määritellä ominaishalkaisija, ominaispituus ja porttien asema toisiinsa nähden. Ominaispituus tarkoittaa halkaisijan suuruutta, johon virtaus voi laajentua portin sisäänmenon jälkeen. Ominaispituus vaikuttaa virtauksen häviöiden laskemiseen ulostulojen kohdalla. Ominaispituus on matka, jonka virtaus voi kulkea ennen osumista seinämään tai seuraavaan porttiin. Määritetyllä pituudella on vaikutusta erityisesti painepulssien etenemisen laskemiseen. Porttien asema toisiinsa nähden määritetään kolmiulotteisessa koordinaatistossa, joita käytetään painemuutoksien laskemiseen suunnanmuutoksien vaikutuksesta.

Virtauksen jako-osaa voidaan tutkia kolmiulotteisella työkalulla, josta voidaan varmistaa, että portit ovat toisiinsa nähden oikeassa asemassa. Kuvassa 6 on havainnollistettu työkalun avulla kollektorin porttien asemaa toisiinsa nähden.

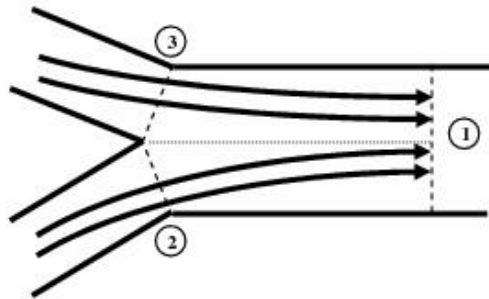


Kuva 6. Kolmiulotteinen työkalu.

Kuvissa 7 ja 8 havainnollistetaan ominaishalkaisijan määrittämistä kahden yksinkertaisen virtauskomponentin avulla. Ensimmäisessä kuvassa kerrotaan esimerkin avulla, miten moni venttiili sylinterikannen ominaishalkaisijat voidaan laskea. Kuten kaavoista 7 ja 8 voidaan nähdä, putkien ominaishalkaisijat pitää laskea erikseen. Jos sama tilanne olisi toisinpäin eli yhdenaikainen virtaus kulkisi putkesta yksi putkiin kaksi ja kolme, käytettäisiin putkien kaksi ja kolme ominaishalkaisijoina suunnilleen puolta putken numero yksi halkaisijasta.

### 1. Yhdenaikainen virtaus

Esimerkki: Moni venttiilinen sylinterikansi



Kuva 7. Yhdenaikainen virtaus.

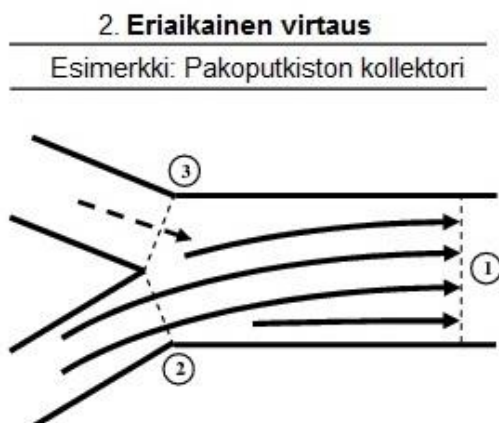
$$\text{Ominaishalkaisija } \varnothing_1 = \text{Putki}\varnothing_1$$

7

$$\text{Ominaishalkaisija } \varnothing_2, \varnothing_3 = \sqrt{0,5 * \text{Putki}\varnothing_1^2}$$

8

Jos virtaus on eriaikaista kuten esimerkin pakoputkiston kollektorissa, pääsee virtaus laajentumaan koko putken yksi halkaisijan alueelle, joten kaikkien putkien ominaishalkaisija käytetään putken yksi halkaisijaa kaavojen 9 ja 10 osoittamalla tavalla.



Kuva 8. Eriaikainen virtaus.

$$\text{Ominaishalkaisija } \varnothing_1 = \text{Putki}\varnothing_1 \quad 9$$

$$\text{Ominaishalkaisija } \varnothing_2, \varnothing_3 = \text{Putki}\varnothing_1 \quad 10$$

#### 4.5 Seinämän lämpötilan laskuri

Putkien ja virtauksenjakokomponenttien seinämien lämpötilat voidaan määrittää joko sijoittamalla osalle käytettävä seinämän lämpötila itse, tai käyttämällä seinämän lämpötilan laskuria. Laskuri käyttää seinämien lämpötilojen laskemiseen sisäistä lämmönsiirtoa, ulkoista lämmönsiirtoa, lämpökapasiteettia ja käyttäjän määrittämää lämpötilaa laskennan lähtötilanteessa. Ulkoinen lämmönsiirto on putkien ulkopinnalta ympäristöön vapautuvaa säteilyä. Käytettäessä laskuria ulkoista lämmönsiirtoa kuvaava arvo pitää määrittää, joka yleisesti on noin 5–20 W/m<sup>2</sup> -K. Myös materiaalin emissiivisyys pitää määrittää, jonka arvoina käytetään 0,5–0,8, joista pienempää käytetään kirkaspintaisille materiaaleille.

Seinämän lämpötilan laskuria voi käyttää, joko vakaan tilan (steady-state) tai muuttuvan tilan (transient) simuloinnissa. Muuttuvan tilan simulointia käytetään tutkittaessa

esimerkiksi moottorissa tapahtuvia muutoksia sen lämmitessä. Yleisimmin moottorin suorituskyvyn tutkimiseen käytetyssä vakaan tilan simuloinnissa laskuri pyrkii löytämään oikean seinämän lämpötilan mahdollisimman, joten simulointi on nopeampaa.

Lämpötilan laskuria käytetään usein vain pakosarjan ja pakoputkien seinämien lämpötilojen laskemiseen, koska pakopuolen seinämien lämpötilan muutokset vaikuttavat suuresti paineaaltojen taajuuteen. Pakopuolen lämpötilat muuttuvat enemmän kierrosnopeuden kasvamisen vaikutuksesta, kuin imupuolen seinämien lämpötilat, jolloin vain imupuolella käytetään yleisesti kiinteitä seinämien lämpötiloja.

#### 4.6 Imu- ja pakokanavat

Sylinteriin johtavien imu- ja pakokanavien mallinnukseen käytetään yleisesti suoria putkia. Mallinnuksessa on kuitenkin otettava huomioon muutama tärkeä asia tarkkojen tulosten saavuttamiseksi. Virtausarvomittausta tehtäessä moottorin sylinterikannesta kanavan muotojen (muutokset halkaisijassa, mutkat), pinnankarheuden tai venttiilinvarren aiheuttamia häviöitä ei pystytä erottelemaan mittauksesta, jolloin virtausmittauksen tuloksiin sisältyy jo kanavan aiheuttamat häviöt. Jotta häviöt eivät sisältyisi simulaatiossa kahdesti, pitää kitkakerroin (friction multiplier) ja painehäviökertoimet (pressure loss coefficients) asettaa nollassi putkille, joita käytetään kanavien mallintamisessa.

Lämmönsiirtymistä putken seinämiin kuitenkin esiintyy ilmavirran vaikutuksesta. Lämmönsiirtokerroin (Heat Transfer Multiplier) tulisi asettaa välille yhdestä ja puolesta kahteen, koska se huomio kanavassa olevia mutkia, pinnankarheutta sekä venttiilinvarren aiheuttamaa turbulenssia. Jos kanavien seinämien lämpötilat eivät ole tiedossa ja käytössä on moottorin sylinterin sisäisiä lämpötiloja kuvaava EngCylTWall-sapluuna, käytetään seuraavia suosituksia kanavien seinämien lämpötilojen lähtöarvoina: 450 kelviniä imu- ja 550 kelviniä pakokanavassa. Korkeita seinämän lämpötiloja käytetään kuvaamaan lämmönsiirtoa kuumista venttiileistä.

Käytettäessä EngCylTWallDetail- tai EngCylTWallSoln-sapluunaa ei kanavien seinämien lämpötiloja ole tarpeellista nostaa keinotekoisen korkeaksi vaan lämpötilojen tulisi vastata suunnilleen jäähdytysnesteen lämpötilaa. Nämä sapluunat kuitenkin tarvitsevat



paljon tarkempia tietoja sylinterin seinämien eri osista, joten niiden käyttö ilman tarkkoja sylinteritutkimuksia on perusteetonta.

#### 4.7 Osien väliset yhteydet

Projektikartan kaikkien fyysisten osien toisiinsa linkittämisen yhteydessä luodaan yhteys linkitettävien osien välillä. Nämä yhteydet ovat tasoja, joissa liikemäärän jatkuvuusyhtälöllä ratkaistaan aineen massavirta ja nopeus. Käytössä on useista erilaisista yhteyksiä kuvaavia vaihtoehtoja, joista yleisimpänä virtauskomponenttien suuaukkojen välisiä suhteita kuvaava OrificeConn, joka määrittellään pyöreänä reikänä. OrificeConn yhteyskomponentissa määritetään reiän halkaisija, reikien määrä sekä purkauserroin molempiin suuntiin. Yhteyskomponentin avulla voidaan vaikuttaa osien väliseen virtaukseen, rajoittamalla tai parantamalla sitä.

Virtausta voidaan rajoittaa asettamalla OrificeConn-halkaisija pienemmäksi kuin yhdistettävien osien suuaukkojen halkaisijat. Komponentti on hyödyllinen esimerkiksi mallinnettaessa pakoputkiston vastapainetta, rajoittamalla virtausta, jolloin oikea vastapaine saadaan kalibroituja mallintamatta oikean putkiston virtausta kuristavaa osaa kuten katalysaattoria. Käytettäessä yhteyskomponentin def-oletusarvoja, käyttää ohjelma virtauksen laskemiseen pienemmän suuaukon halkaisijaa.

Reiän halkaisijan lisäksi virtauskomponentissa pitää määritellä virtauksen purkauserroimet molempiin suuntiin. Koska ohjelman oletusasetus on, että kaikkien erikokoisten liitoksien reunat ovat teräviä, käytetään purkauserroimia kuvaamaan reunojen pyöristyksien suuruutta. Jos purkauserroimenä käytetään def-arvoa ja mallinnettaessa pientä aukkoa, kahden suuren aukon välissä, purkauserroin on noin 0,6. Virtauksen mentäessä suuresta putkesta pieneen putkeen, purkauserroin on noin 0,8. Jos putkien ulostulojen halkaisijat ovat identtisiä, purkauserroin on 1. Purkauserroimien asetettaessa tulee olla tarkkana, koska niillä on usein melko merkittävä vaikutus simulointituloksiin.

#### 4.8 Venttiilit

Venttiilejä mallinnettaessa ohjelman kirjastosta valitaan tarkoitukseen sopiva Valve\*Conn-sapluuna. ValveCam\*conn on lautasventtiilien mallinnuksessa käytettävä sapluuna, jossa nokka-akselin profiili tunnetaan kampikulman funktiona. Suurin osa sapluunoista käyttää purkautumiskerrointa kuvaamaan venttiilin virtausta venttiilin eri nos-toilla. Purkautumiskertoimet lasketaan virtauspenkissä tehtävästä sylinterikannen virtausmittauksesta saaduilla arvoilla käyttämällä ohjelman tarjoamaa valmista Excel-laskuria kaavan 8 mukaisesti. Purkautumiskertoimia laskettaessa on tärkeää muistaa käyttää samaa referenssiarvoa kuin ValveCam\*conn-objektissa. Referenssiarvo on sama kuin venttiilin halkaisija käytettäessä laskemiseen sylinterikannen virtausmittauksesta saatuja tuloksia.

$$\dot{m} = C_d A_r \rho_0 \sqrt{RT_0} (P_r)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[ 1 - P_r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{0,5} \quad 8$$

$\dot{m}$  = massavirta [kg/s]

$C_d$  = purkauserroin

$A_r$  = referenssipinta-ala [m<sup>2</sup>]

$\rho_0$  = tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$P_r$  = staattinen painesuhde

$R$  = kaasuvakio [J/kg\*K]

$T_0$  = lämpötila [K]

$\gamma$  = ominaislämpösuhde

## 4.9 Sylinteri

### 4.9.1 Lämmönsiirto

Sylinterin lämmönsiirron mallintamiseen käytetään yleisesti kahta referenssiobjektia: EngCylTWall ja EngCylHeatTr. Ensimmäistä referenssiobjektia käytetään kuvaamaan palotilan, männän ja sylinterin seinämien lämpötiloja. Sylinterin seinämän lämpötilana käytetään yleisesti noin 400 kelviniä ja palotilan ja männän seinämien lämpötiloina 550–600 kelviniä. EngCylHeatTr-referenssiobjektin avulla määritetään sylinterin lämmönsiirron laskemiseen käytetty malli. Malleja on useita erilaisia, mutta yleisin niistä on WoschniGT, jonka käyttö on suositeltavaa silloin kun moottorissa esiintyvän pyörteilyn ominaisuuksia ei ole tiedossa. Lisäksi lämmönsiirron laskemiseen vaadittavia arvoja ovat männän laen ja sylinteriporauksen pinta-alojen suhde sekä palotilan ja sylinteriporauksen pinta-alojen suhde.

### 4.9.2 Palaminen

GT-Powerissa on käytössä useita erilaisia vaihtoehtoja palamistapahtuman mallintamiseen. Ne jakautuvat kuitenkin kahteen eri tyyppiin, ennakoiviin ja ennakoimattomiin vakiomalleihin. Teoriassa ennakoivat mallit soveltuvat kaikkiin simulointimalleihin, mutta ne kuitenkin tarvitsevat toimiakseen paljon enemmän lähtötietoja, kuten sylinterin paineprofiilin. Paineprofiilin mittaaminen sylinteristä on hyvin haastavaa, joten useimmiten tarvittavia lähtötietoja ei ole edes saatavilla. Ennakoivat mallit lisäävät myös laskentamallin monimutkaisuutta, jolloin se pidentää laskemisen käytettävää aikaa.

Vakiomallit yksinkertaistavat palamismallin määrittämällä palamisnopeuden kampikulman funktiona. Palamismalli olettaa myös, että sylinterissä on riittävä määrä polttoainetta saatavilla määrätyn palamisnopeuden toteuttamiseksi, jolloin ohjelma laskee ilma- ja polttoaineseoksesta palamisessa vapautuvan energian määrän. Vakiomallien laskeminen on paljon nopeampaa ja niiden käyttö onkin suositeltavaa aina, kun palamisnopeuden muutokset ovat pieniä tai niillä ei ole suoraa vaikutusta tutkittavaan muuttujiin. Vakiomalli soveltuu hyvin esimerkiksi tässä työssä tutkittavan nokka-akselin profiilin ja ajoituksen analysoimiseen.

Tässä työssä palamismallina käytetään ottomoottoreissa yleisesti käytettyä vakio Eng-CylCombSIWiebe-mallia, joka laskee palamisnopeuden käyttämällä Wiebe-yhtälöä. SiWiebe-malliin lisättäviä referenssiarvoja ovat kampikulma yläkuolokohdasta 50:n % palamiselle, palamisaika kampikulmana 10–90 % palamiselle sekä Wiebe-exponentti ( $def = 2$ ). Objektiin voidaan määrittää lisäksi lisätietoina ominaisuuksia palamiselle ja nakutukselle. 50:n % palamiselle suositeltavia arvoja ovat 5–12 astetta yläkuolokohdan jälkeen ja 10–90 % palamiselle 25–35 astetta. Palamisnopeuksien avulla voidaan myös esimerkiksi säätää sytytysennakon määrää, koska ohjelmaan ei pysty syöttämään erillistä lukuarvoa asian määrittämiseksi.

#### 4.10 Polttoaineen ruiskutus

Ohjelmassa on valittavana useita erilaisia polttoaineenruiskutuksen mallintamiseen käytettäviä sapluunoita moottorien rakenteesta riippuen, mutta tässä työssä keskitytään vain ottomoottoreiden ruiskutusvaihtoehtoihin. Suuttimia voidaan yhdistää suoraan sylintereihin tai virtauskomponenttien osiin mallinnettaessa esimerkiksi kaasutinta tai imusarjaruiskutteista moottoria. Kaksi yleisintä mallia on InjAF-RatioConn ja InjAF-SeqConn. InjAF-RatioConn-mallia käytetään yleisesti kuvaamaan kaasutinta, koska se ruiskuttaa polttoainetta jatkuvasti määritetyn ilma-polttoainesuhteen mukaisesti. InjAF-SeqConn on sekventiaalista ruiskutusta kuvaava suutinmalli, jota voidaan käyttää jos tiedetään moottorin ilma-polttoaineseoksen seossuhde ja suuttimen tuottama massavirta. Suuttimen tuottamaa massavirtaa on vaikea mitata, jolloin se voidaan laskea kaavalla 9, käyttämällä arvoja moottorin korkeimmalla kierrosluvulla. Laskukaavan valmis laskupohja löytyy ohjelman Excel-tiedostoista.

$$\dot{m}_{del} = \eta_v \rho_{ref} N_{RPM} V_D \left( \frac{F}{A} \right) \frac{6}{(\#Cyl)(PW)} \quad 11$$

$$\dot{m}_{del} = \text{suuttimen syöttö [g/s]}$$

$$\eta_v = \text{volymetrinen hyötysuhde}$$

$\rho_{ref}$  = referenssipaine volymetrisele hyötysuhteelle [kg/m<sup>3</sup>]

$N_{RPM}$  = moottorin pyörintänopeus

$F/A$  = polttoaineilma-seossuhde

$\#Cyl$  = sylinterien määrä

$PW$  = suihkutuksen kesto

#### 4.11 Kitka- ja apulaitehäviöt

Moottorin mekaanisten kitkojen mallintamiseen käytetään EngFrictionCF-viiteobjektia. Objektiin voidaan myös lisätä apulaitteiden vaikutuksesta syntyvät häviöt, ellei niiden suuruus ole erikseen tiedossa, jolloin ne voidaan yhdistää myös omina osinaan. Kitkan referenssiobjektin määriteltäviä arvoja ovat jatkuva kitkahäviö, sylinteripaineen aiheuttaman kitka, männän nopeuden aiheuttama kitka ja männän nopeuden aiheuttaman kitkan neliö. Koska kitkahäviöitä on ilman laboratorio-olosuhteita vaikea mitata, ohjelma antaa muuttujille suositeltuja lähtöarvoja. Jatkuvan kitkahäviön suositellut arvot ovat 0,3–0,5 baaria, sylinteripaineen kitkan kertoimeksi 0,004–0,006, männän keskinopeuden kertoimeksi 0,08–0,10 m/s ja männän keskinopeuden neliöksi nolla jos muissa kohdissa käytetään suositeltuja arvoja. Ohjelma käyttää kitkahäviöiden laskemiseen Chen–Flynn-mallia, kaava 12. Kitkahäviöiden kalibroimisesta kerrotaan myöhemmässä osiossa.

$$FMEP = C + (PF * P_{max}) + (Mpsf * Speed_{mp}) + (Mpssf * Speed_{mp}^2) \quad 12$$

$C$  = jatkuva kitkahäviö [bar]

$PF$  = sylinteripaineen aiheuttaman kitkan kerroin [-]

$P_{\max}$  = sylinterin maksimipaine [bar]

$M_{psf}$  = männän keskinopeuden aiheuttama kitka [bar/(m/s)]

$M_{pssf}$  = männän keskinopeuden aiheuttaman kitkan neliö [bar/(m/s)<sup>2</sup>]

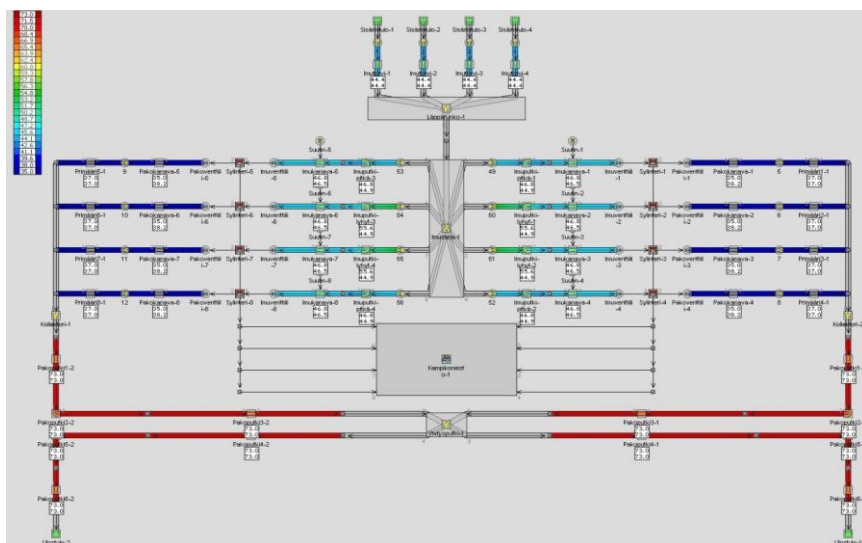
$Speed_{mp}$  = männän keskinopeus [m/s]

## 5 Simulointimallin ja mittausdatan korreloiminen

Simulointimallin korreloimisen mitatun datan kanssa perustuvat moottorin fysikaalisten tekijöiden analysoimiseen, jotka vaikuttavat moottorin vääntöön ja muihin suorituskyvyn parametreihin. Vapaasti hengittävän moottorin ilma-polttoainesuhde ja vääntömomentti pystytään tarkasti arvioimaan vasta, kun volymetrinen hyötysuhde, sylinterin paineprofiili ja moottorin kitkahäviöt on oikein kalibroitu. Tästä syystä on tarpeen kerätä riittävästi mitattua dataa moottoridynamometrissä, kuten seuraavassa osiossa kuvataan.

### 5.1 Kirjoitus- ja yksikkövirheet

Ennen uuden mallin ensimmäistä simulointikertaa on hyvä tarkastaa arvot suurien virheiden välttämiseksi. Korreloimisen ensimmäinen vaihe poistaa suurimmat kirjoitus ja yksikkövirheet. Nämä virheet aiheuttavat yleensä perättömiä tuloksia, kuten negatiivista vääntömomenttia tai epärealistien korkean volymetrisen hyötysuhteen. Näiden virheiden löytämiseen on käytössä muutamia keinoja, kuten sijoittamalla tärkeät arvot eli osien halkaisijat tai pituudet GT-Postissa käyttäen RLTC contourMap-toimintoa. Näkymä näyttää arvot käyttäen väriskaalaa, jossa selvästi virheellinen arvo erottuu helposti värikartasta. Kuvassa 9 on käytetty RLTC contourMap-toimintoa putkien suuakkojen halkaisijoiden esittämiseen.



Kuva 9. Värikartta.

## 5.2 Kertoimien oikea käyttö

Kertoimien avulla mallia voidaan hienosäätää niin, että tulokset vastaavat paremmin mittauksia. Jos kertoimia käytetään perusteettoman suurina, ne voivat piilottaa alleen simuloinnissa aiheutuvan todellisen virhelähteen. Pääsääntönä voidaan pitää, että kertoimet eivät saisi ilman perusteltua syytä olla suurempia kuin kaksi.

## 5.3 Korreloimiseen tarvittava mittausdata

Simulointimallin rakentamisen jälkeen tehtävään mallin kalibrointiin käytettäviä tietoja on paljon, mutta niiden mittaaminen moottorista saattaa olla haasteellista. Korreloimiseen käytettäviä mittatietoja ovat: teho- ja vääntökäyrä, moottorin kitkahäviöt, ilmanvirtaus, polttoaineen virtaus, polttoaineilma seossuhde, tehollinen keskipaine, imu, ja pakosarjan lämpötila ja paine, sylinteripaine, dynaaminen imupuolen paine imuputkessa ja dynaaminen paine pakoputkessa äänenvaimentimen ja pakosarjan välissä. Joskus mitatut arvot eivät ole kovin tarkkoja, joten on tärkeää tarkistaa myös mittaustuloksien tarkkuus ja johdonmukaisuus. Yksi tapa tarkistaa johdonmukaisuus on laskea mitattujen arvojen avulla jokin arvo ja verrata sen tulosta mittaamalla saatuun arvoon.



## 6 Kalibrointimenetelmä

Kalibroimisen jälkeen simulointitulosten tulisi täsmätä mitattuja arvoja. Osiossa käydään askelittain läpi yleisimmin tehtävä kalibrointimenetelmä seuraavassa esitetyssä järjestyksessä:

1. Kalibroidaan imusarjan paine kahden prosentin tarkkuudella käyttämällä suurinta kierrosnopeutta, jolloin mahdollinen virhe on helpoin huomata. Tämän jälkeen tarkastetaan paine myös muilla kierrosalueilla.
2. Seuraavaksi kalibroidaan volymetrinen hyötysuhde viiden prosentin tarkkuudella käyttämällä suurinta kierrosnopeutta, jonka jälkeen sama tehdään muilla kierrosalueilla.
3. Kolmantena tehdään putkiston vastapaineen kalibrointi, johon käytetään vain suurinta kierrosnopeutta.
4. Sylinteripaineen kalibroiminen tehdään askelittain aloittamalla puristustahdistusta, sitten palamisen aikana ja lopuksi työtahdin aikana.
5. Pakokaasun lämpötilojen kalibroiminen aloitetaan pakokanavan lämmönsiirtokertoimesta, jonka jälkeen tarkastetaan putkiston seinämän lämpötila.
6. Moottorin kitkahäviöt kalibroidaan viimeisenä, kun moottorin volymetrinen hyötysuhde on saatu oikein kalibroitua.

### 6.1 Imusarjan paineen kalibroiminen

Kalibroiminen tulisi aloittaa sulkemalla pois ensin virtaushäviöitä aiheuttavat ongelmat imuputkien ja imusarjan välillä. Mittaustulosten ja simulointitulosten väliset erot aiheutuvat yleensä painehäviöiden epätarkkuuksista, virtausta rajoittavista tekijöistä tai järjestelmän lämmönsiirtoon liittyvistä virheistä. Käyttämällä GT-Postin RLTC contourMapia suurimmalla kierrosalueella, voidaan värikartaston avulla löytää painehäviöitä aiheutta-

va kohta, jos sen häviö on hyvin suuri. Toinen tarkastettava asia on imusarjan paine, jonka pitäisi hyvin suunnitelluissa moottoreissa olla täyskaasulla noin 0,06 baaria pienempi kuin imupuolen paine.

## 6.2 Volymetrinen hyötysuhde

Ottomoottorin volymetrinen hyötysuhde on kaikkein vaikutusvaltaisin moottorin suorituskykyyn vaikuttava tekijä kun ilma-polttoainesuhde on kiinteä. Kun mallissa käytetään ilma-polttoainesuhdetta määrittämään polttoaineen määrä ja volymetristä hyötysuhdetta ei pystytä laskemaan riittävällä tarkkuudella, niin kaikki yritykset korreloida moottorin suorituskykyä vaatii kohtuuttomia muutoksia muilta säätöarvoilta. Suurimpia volymetriseen hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä ovat imu- ja pakoventtiilien tapahtumat, imukanavat, imuputket, imusarja ja imupuolen seinämien lämpötilat. Vähemmän vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa pakopuolen seinämien lähtölämpötilat.

### 6.2.1 Volymetrisen hyötysuhteen kalibroiminen

Ympäristön olosuhteet kuten, paine ja lämpötila tulee asettaa samoiksi kuin ympäristön olosuhteet, jossa oikean moottorin mittaukset suoritettiin, koska massavirta on verrannollinen ilman tiheyteen. Myös volymetrisen hyötysuhteen referenssiarvoksi määritetyt arvot tulee olla samat kuin oikean moottorin mittauksessa vallinneet olosuhteet.

Imuventtiilin purkauskertoimet ovat erittäin merkityksellisiä volymetriseen hyötysuhteeseen moottorin toimiessa korkealla kierrosalueella. Pakoventtiilin merkitys on hieman vähäisempi, mutta kummankin venttiilin kohdalla on syytä tarkastaa, että purkauskertoimet on laskettu oikein. Myös imuputken ja imusarjan välisen yhteyden purkauskertoimen on syytä tarkastaa, koska ohjelma käyttää oletusarvolla (def) liian pientä kerrointa, jolloin uudeksi arvoksi asetetaan 0,92–0,98, joka kuvaa ilmavirtauksen sujuvaa siirtymistä imuputkiin. Imusarjan ominaishalkaisijoiden vaikutus hyötysuhteeseen on myös melko merkittävä tekijä, joten niiden määrittämisessä tulee olla tarkkana.

### 6.2.2 Lämmönsiirron vaikutus

Imu- ja pakokanavien seinämien kitka ja painehäviökertoimet pitää asettaa nollassa, koska ne otettiin huomioon jo virtausmittauksessa. Imukanavan seinämän lämpötilalla on vaikutusta hyötysuhteeseen, koska jos seinämä on liian kuuma, vähenee sylinteriin kulkevan ilman määrä tiheyden pienenemisen seurauksena.

### 6.2.3 Venttiili tapahtumien vaikutus

Aikainen imuventtiilin sulkeutuminen aiheuttaa volymetriseen hyötysuhteen kasvamisen matalalla kierrosalueella ja hyötysuhteen pienenemisen korkealla kierrosalueella. Imuventtiilin myöhäinen sulkeutuminen kääntää tilanteen toisinpäin, jolloin hyötysuhde on parempi korkealla ja huonompi matalalla kierrosalueella. Pakoventtiilin ajoituksella on pienempi vaikutus moottorin matalammilla kierroksilla, mutta samankaltainen vaikutus korkealla kierrosalueella. Voidaan siis todeta, että venttiilien ajoituksella, nostoprofiililla ja venttiiliväläyksillä on merkittävä vaikutus simulaation ja oikean moottorin volymetriseen hyötysuhteeseen.

Venttiiliväläys ei ole helposti mitattava muuttuja, koska se voi vaihdella eri kierrosnopeuksilla. Venttiilin lämpötilat kasvavat nopeuksien kasvaessa, jolloin lämpölaajenemisen seurauksena venttiiliväläys ei myöskään välttämättä pysy vakiona. Työntötankomootoreissa tapahtuu myös muutosta moottorin pyörintänopeuden kasvaessa, jolloin venttiilin dynaaminen nostoprofiili ei ole samanlainen kuin staattisessa tilassa. Korkealla kierrosalueella (yli 4000 rpm) työntötankojen elastisuuden takia venttiilin dynaaminen nostoprofiili on usein lyhyempi kuin mittaamalla saatu profiili. Asiaa voi korjata luomalla referenssiobjektin, jossa venttiiliväläys ja nostoprofiili muuttuvat kertoimien avulla korkealla kierrosalueella. Työntötankomootorissa nostoprofiiliin vaikuttaa myös keinuvälikkuus, joka ei pysy vakiona venttiilin noston aikana.

### 6.3 Putkiston vastapaineen kalibroiminen

Simulaation pakoputkiston vastapaine voidaan kalibroida asettamalla pakoputkeen OrificeConn-objekti kohtaan, jossa oikeassakin putkessa on virtausta rajoittava tekijä kuten katalysaattori tai äänenvaimennin. OrificeConn-objektissa voidaan määrittää reiän halkaisijan suuruus, jolla voidaan rajoittaa pakokaasun virtausta ja näin ollen kuvata putkiston vastapainetta. Objektiin kohtaan, johon normaalisti määritetään numeerinen arvo, lisätään siihen parametri kirjoittamalla esimerkiksi [vastapaine]. Tällöin ohjelman valikkoon (Case Setup) ilmestyy uusi parametri, jolle pitää määrittää arvioitu lähtöarvo. Ohjelman suoraa optimointityökalua käyttämällä valikkoon asetetaan tavoitearvo, joksi valitaan oikeasta moottorista mitattu putkiston vastapaineen suuruus. Muuttujaksi asetetaan OrificeConn-objektin reiän halkaisija, jolloin ohjelma etsii halkaisijan suuruutta muuttamalla oikeaa painetta, kunnes aiemmin putkiston vastapaineeksi asetettu tavoitearvo saavutetaan.

### 6.4 Sylinteripaineen kalibroiminen

Sylinteripaineen kalibroiminen sisältää useita eri osioita. Ensin analysoidaan mitattujen arvojen laatua ja johdonmukaisuutta oikeasta moottorista, jotta niitä voidaan käyttää simuloimisen kalibroimisessa. Varsinainen kalibrointi aloitetaan yhteen sovittamalla mallin sylinteripaine palamisen alkaessa. Seuraavaksi analysoidaan paine palamisen aikana ja lopuksi kalibroidaan sylinterin lämmönsiirto. Tärkeintä on saada sylinterin paineprofiili vastaamaan oikean moottorin paineprofiilia palamisen aikana.

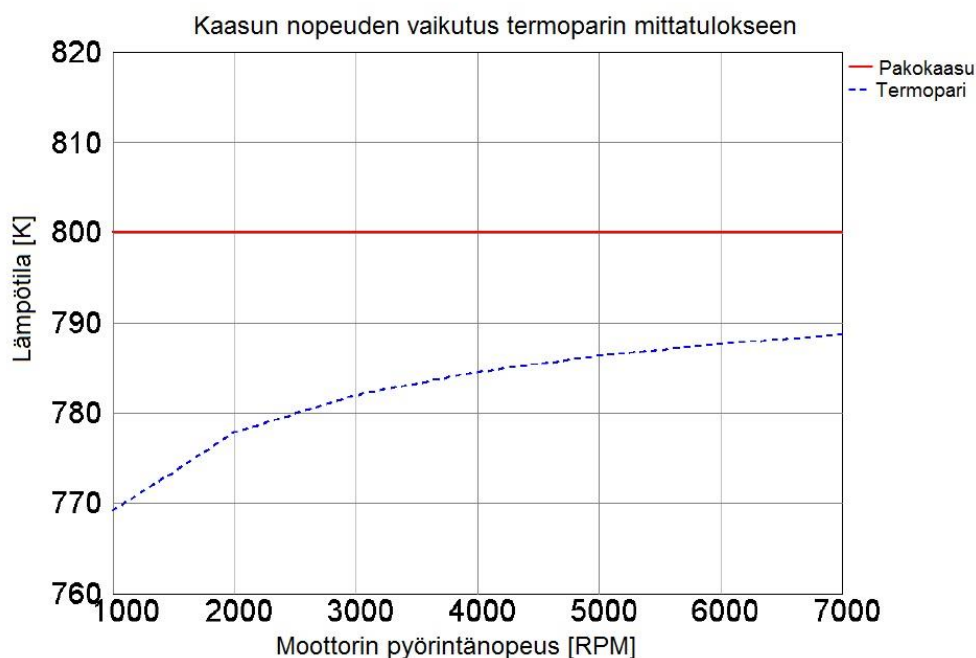
Ohjelmassa on valittavana kaksi tapaa laskea sopiva palamisnopeus. Tavat eroavat toisistaan vain tarvittavien lähtötietojen määrän suhteen. Tässä työssä käydään läpi yksinkertaisempi tapa, johon tarvitaan lähtöarvona vain sylinterin paine kampikulman suhteen. Palamisnopeuden määrittämiseksi rakennetaan uusi simulointimalli, johon tarvitsee luoda pelkästään sylinterin ja kampikoneiston objektit. Objekteihin lisättäviä tietoja ovat moottorin geometria, sylinterin seinämien lämpötilat, lämmönsiirrossa käytettävä laskentamalli ja alustavat olosuhteet, kuten kaikissa muissakin simulointimalleissa.

Mitattu sylinteripaine syötetään EngBurnRate-sapluunaan, joka lisätään sylinteriin mitatun sylinterinpaineen analyysiobjektin kohtaan (Measured Cylinder Pressure Analysis Object). Sylinteripaineen analysointi malliksi (Cylinder Analysis Object) valitaan pelkästään sylinteripaine (Measured\_CylP\_only). Simuloinnissa käytettävä menetelmä on seuraavanlainen:

1. Syklin alussa tehdään muutamia oletuksia lämmönsiirtomallissa (Woschni), jotta saadaan tehtyä karkea laskenta palamisnopeuden määrittämiseksi.
2. Karkeassa laskennassa saatua palamisnopeutta sovelletaan, jotta todellinen lämmönsiirron määrä saadaan ratkaistua.
3. Kun todellinen lämmönsiirron määrä sylinterissä on saatu ratkaistua, lasketaan todellinen palamisnopeus käyttäen äsken ratkaistua lämmönsiirtoa.
4. Kun sylinterin lämmönsiirto ja palamisnopeus on saatu ratkaistua, lasketaan niiden avulla sylinterissä vallitseva paine ja verrataan sitä mitattuun sylinteripaineeseen.

## 6.5 Pakokaasun lämpötilan kalibroiminen

Edes hyvin kalibroidulla simulointimallilla ei välttämättä saada samoja tuloksia pakokaasun lämpötilan suhteen kuin mitatusta moottorista, koska GT-Power laskee pakokaasun todellisen kaasun lämpötilan ja oikeasta moottorista tulevan pakokaasun lämpötilan mittaamiseen käytetään termoparia. Termoparin avulla saadaan todennäköisesti pienempiä mittatuloksia, koska termoparista johtaa lämpöä putken seinämään. Lämpötilaero mitatun ja simuloinnissa saatujen tulosten välillä vaihtelee seinämän lämpötilan ja kaasun nopeuden suhteen kuten kuvasta 10 voidaan todeta.



Kuva 10. Kaasun nopeuden vaikutus lämpötilaan.

Jos kaasun ja seinämän lämpötilaero on hyvin pieni kuten moottorin imupuolella, termoparilla mitattuja tuloksia voidaan pitää yhdenvertaisina simuloinnin tuloksiin. Lämpötilojen kalibroimiseksi moottorin pakopuolella, voidaan ohjelman virtausvalikosta kalibroida lämmön kuljettumiskerroin (Convection multiplier), jolloin lämpötila saadaan vastaamaan oikeasta moottorista mitattua kaasun lämpötilaa.

## 6.6 Moottorin kitkojen ja apulaitehäviöiden kalibroiminen

Simulointimallin kitkahäviöiden kalibroimiseen tarvitsee oikeasta moottorista mitata moottorin vääntömomentti, josta lopuksi lasketaan tehollinen keskipaine. Tämä saadaan ajamalla moottoria moottoridynamometrissä vakaassa tilassa tietyllä kierrosluvulla, jolloin polttoaineen ruiskutus käyvästä moottorista katkaistaan, ja mitataan moottorin pyörittämiseen tarvittava vääntömomentti. Mittaukset suoritetaan usealla kierrosluvulla, jolloin kalibroinnista saadaan tehtyä tarkempi. Jotta mittaustulosta voidaan käyttää simulointimallin kitkahäviöiden laskemiseen, tarvitsee oikean moottorin mitatusta vään-

töarvosta ensin vähentää pumppaus- ja lämpöhäviöt, jolloin tulokseksi saadaan lasketua oikean moottorin tehollinen keskipaine.

Simulointimallin kalibroiminen aloitetaan poistamalla polttoaineen suuttimet käytöstä, joka vaikuttaa simulointituloksiin siten, että esimerkiksi teho- ja vääntökäyrien arvoista tulee negatiivisia. Ennen simuloinnin aloittamista, EngFrictionCF-referenssiobjektin kaikki arvot paitsi sylinteripaineen kitkan kerroin tulee asettaa nolleen. Sylinteripaineen kitkan kertoimeksi asetetaan 0,005, joka kuvaa kitkan arvioitua vaikutusta sylinterin paineeseen. Myös seinämien lämpötilan laskemiseen käytetty WallTempSolver asetetaan kokonaan pois käytöstä ja sylinterin sekä pakopuolen seinämien lämpötilat tulee asettaa manuaalisesti vastaamaan oikeassa moottorissa vallinneita olosuhteita. Seuraavaksi simulointi voidaan käynnistää käyttäen samoja kierroslukuja, jossa oikean moottorin mittauksetkin suoritettiin.

Simuloinnissa eri kierrosluvuilla saadut tehollisen keskipaineen arvot muutetaan positiivisiksi ja vähennetään moottorin tehollisesta keskipaineesta. Vähennyslaskun tuloksena saadaan kitka- ja apulaitehäviöt. Lopuksi EngFrictionCF-referenssiobjektiin lisätään RLTDependenceXY'Table, vakiotermi (Constant part of FMEP) kohtaan, johon Y-sarakkeeseen lisätään äsken lasketut kitkahäviöt ja X-sarakkeeseen mittakohdissa käytetty kierrosluku. EngFrictionCF-referenssiobjektin muiden muuttujien arvot säilytetään nollessa ja sylinteripaineen kitkan kertoimenä käytetään edelleen 0,005, koska se sisältyi jo moottorin tehollisen keskipaineen simuloimiseen.





on suuri vaikutus moottorin toimintaan. Määritettäviä arvoja ovat paine, lämpötila ja virtaavan aineen koostumus. Vapaavalintaisina syötettäviä arvoja ovat muun muassa ilmakeuhuus ja ilman tiheyteen vaikuttava korkeusasema. Kyseisessä simulaatiossa ne kuitenkin jätetään huomioimatta, jolloin käytössä ovat ohjelman valmiit oletusarvot. Kuvasta 12 nähdään sisääntulo-objektiin määritettävät ominaisuudet.

Attribute	Unit	Object Value
Pressure (Absolute)	bar	1.013
Temperature	K	293.15
Pressure Flag		standard(total)
Composition		air

Kuva 12. Ympäristön olosuhteiden määrittäminen.

Mallin rakentaminen aloitetaan määrittelemällä sisääntulon alkuympäristön olosuhteet käyttämällä EndEnvironment -saplunaa. Paineena käytetään normaalia ilmanpainetta eli 1,013 baaria ja lämpötilana 293,15 kelviniä (20 °C). Pressure Flag -valikosta valitaan sisääntulon määrittämiseksi Standard(total). Tämä valinta tarkoittaa sitä, että virtausta saattaa tapahtua rajapinnan molempiin suuntiin painepulssien vaikutuksesta. Ympäristön koostumukseksi valitaan ilma, jonka seos on valmiiksi määritelty ohjelman kirjastossa. Kirjainten vihreä väri osoittaa, että arvolla on hyperlinkki ohjelman kirjastoon.

### 7.1.2 Alkuympäristön ja imutorven liitos

Alkuympäristön ja ensimmäisen virtauskomponentin välistä yhteyttä mallinnettaessa käytetään yleisesti bellmouth-objektia, joka kuvaa esteetöntä virtauksen kulkeutumista imutorveen. Bellmouth-objektissa purkaukset ovat oletusarvoisesti määriteltä käyttämällä arvoa yksi, jolloin imutorven suuaukon reuna on tavallaan pyöristetty eikä siitä aiheudu virtaushäviöitä. Kuvassa 13 on bellmouth-objektin oletusarvot.

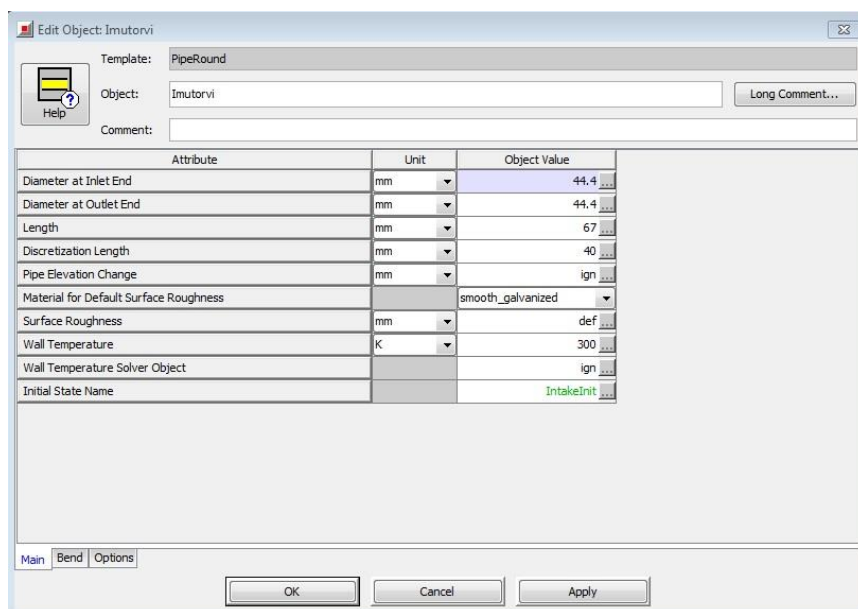
Attribute	Unit	Object Value	Part Override
Hole Diameter	mm	def	
Number of Holes		def	
Forward Discharge Coefficient		1	
Reverse Discharge Coefficient		1	
Hole Thickness	mm	def	
Rounded Corner Radius (only if Discharge Coefficient = "def")	mm	ign	

Kuva 13. Ympäristön ja imutorven välinen yhteys.

### 7.1.3 Imutorvi

Kuvan 14 imutorvi-virtauskomponentin mallintaminen aloitettiin mittaamalla läppärungosta putken halkaisija ja pituus. Kyseisessä simulaatiossa tutkitaan vain täyskaasulla tehtäviä mittauksia, joten erillistä kaasuläppää ei tarvitse mallintaa, jolloin korvaavana osana voidaan käyttää suoria putkia. Putken pituus on 67 mm ja halkaisijat ovat sisä- ja ulostulossa samat eli 44,4 mm. Diskretisoinnin pituudeksi imupuoella määritellään 40 % sylinterin porauksesta eli noin 40 mm. Putken materiaalin pinnanlaaduksi valitaan smooth\_galvanized, joka kuvaa suhteellisen sileää pintaa, jolloin siitä ei aiheudu suurempia virtaushäviöitä. Seinämän lämpötilaksi asetetaan 300 kelviniä, koska lämpöä johtuu kappaleeseen hieman moottorin ollessa sen normaalissa käyttölämpötilassa.

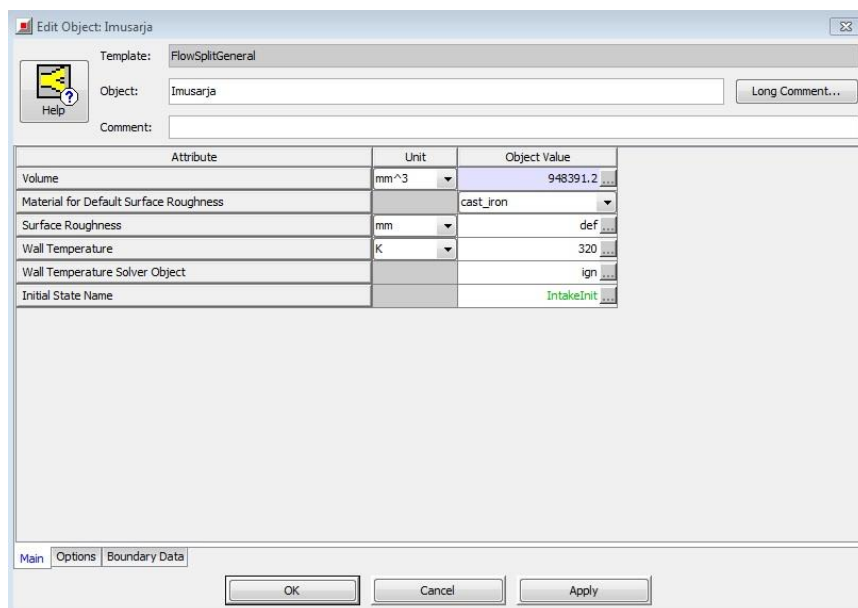
IntakeInit määrittää komponentissa virtaavan aineen alkuolosuhteet laskennan alkaessa. Putken alkuolosuhteiden arvoina käytetään ympäristön vallitsevia olosuhteita.



Kuva 14. Imutorven mallintaminen.

#### 7.1.4 Imusarja

Imusarjan mallintaminen virtauskomponentiksi aloitettiin mittaamalla moottorin imusarjasta kaikki tarvittavat mitat ja tilavuudet 3D-mallinnuskuvan piirtämiseksi Catia V5 -mallinnusohjelmistolla. 3D-mallinnuskuvasta muunnettiin virtauskomponentti käyttämällä Gem3D-ohjelmaa, jossa ohjelma ratkaisee automaattisesti imusarjan tilavuuden, pinta-alan, ominaishalkaisijat, ominaispituudet ja ulostulojen asemat toisiinsa nähden. Imusarjan päävalikossa (kuva 15) tilavuus (Volume) on ohjelman valmiiksi laskema arvo. Imusarjan pinnanlaatu oli melko epätasainen, joten tätä ominaisuutta kuvaavaksi materiaaliksi valittiin valurauta (cast iron). Seinämän lämpötilaksi asetettiin 320 kelviniä, koska seinämän lämpötilat kasvavat siirryttäessä lähemmäksi sylinteriä lämmön johtumisen vaikutuksesta.



Kuva 15. Imusarjan päävalikko.

Imusarjan lisävalikosta voidaan määrittää kitkan kertoimena ja lämmönsiirron kertoimena käytettyjä arvoja, joihin yleisesti suositellaan käyttämään oletusarvoja def (def = 1). Imusarjan pinta-ala suuruus vaikuttaa lämmönsiirron ja kitkan laskemiseen, mutta sen arvo on saatu suoraan virtauskomponenttia mallinnettaessa Gem3D:llä, joten sitä ei ole tarvinnut laskea erikseen. Kuvassa 16 nähdään lisävalikkoon määritettävät arvot.

Template: FlowSplitGeneral

Object: Imusarja

Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Thermocouple Object		ign ...
Friction Multiplier		def ...
Heat Transfer Multiplier		def ...
Surface Area	mm^2	39824.4 ...
Number of Identical Flowsplits		def ...
User Defined Friction Model		ign ...
User Defined Heat Transfer Model		ign ...
Condense/Evaporate Water Vapor (Non-Refrigerant Circuits)		off ...
Heat Input Rate	W	ign ...

Main Options Boundary Data

OK Cancel Apply

Kuva 16. Imusarjan lisävalikko.

Imusarjan ulostulojen eli porttien asema toisiinsa nähden määritellään kolmiulotteisessa koordinaatistossa kuvassa 17. Jokaiselle portille pitää määrittää oma tunnistenumero (Link ID Number), jotta tiedetään mitä ulostuloa käytetään yhdistettäessä porttia seuraavaan virtauskomponenttiin. Jokaisella ulostulolla on myös oma ominaishalkaisija ja ominaispituus, jotka tulee määrittellä joko laskemalla tai käyttämällä Gem3D:n ratkaisemia arvoja.

Edit Object: Imusarja

Template: FlowSplitGeneral

Object: Imusarja

Long Comment...

Comment:

Attribute	Unit	Boundary #1	Boundary #2	Boundary #3	Boundary #4	Boundary #5	Boundary #6
Link ID Number		1	2	3	4	5	6
Angle (Planar Configuration)							
Angle wrt X-axis (3D)		93.644	175.689	175.689	89.948	93.644	
Angle wrt Y-axis (3D)		171.211	90.053	90.053	8.653	171.211	
Angle wrt Z-axis (3D)		82.013	94.31	94.31	81.347	82.013	
Characteristic Length	mm	107.059	83.384	82.932	107.071	109.386	
Expansion Diameter	mm	90.664	102.731	103.011	90.658	89.694	

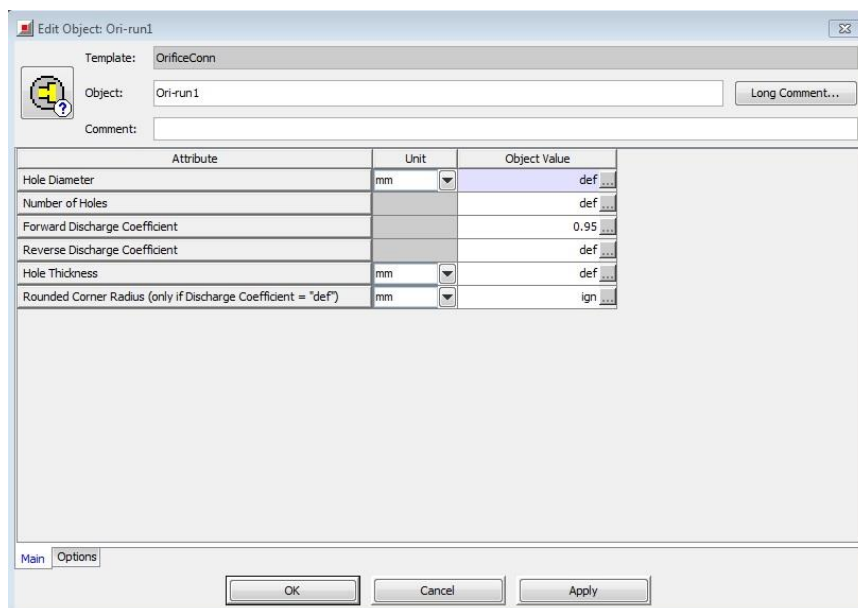
Main Options Boundary Data

OK Cancel Apply

Kuva 17. Imusarjan porttien määrittäminen.

#### 7.1.5 Imusarjan ja -putken liitos

Imusarjan ja -putken välisestä yhteydestä mallinnettaessa kuvassa 18 tarvitsee ottaa huomioon virtauksen sujuva siirtyminen imuputkeen muuttamalla virtauksen etenemissuuntaan purkauk kertoimen (Forward Discharge Coefficient) arvoksi 0,95. Useimmissa imusarjoissa virtauksen siirtyminen imuputkeen on hyvin sujuvaa, joten oletusarvon def käyttäminen lisäisi virtaushäviöitä, jotka eivät ole todellisia.



Kuva 18. Imusarjan ja imuputken välisen yhteyden määrittäminen.

### 7.1.6 Imuputki

Imuputki mallinnettiin käyttämällä kaarevaa putkea Gem3D-ohjelman avulla, jonka tarkkia halkaisijoiden mitat ovat määritelty mallinnuskuvasta tuhannesosamillin tarkkuudella (kuva 19). Simulointimallissa on kaksi eripituista imuputkea, mutta niistä esitellään vain lyhyempi kaarevan putken määrittämisen havainnollistamiseksi. Putken pituudeksi voidaan asettaa def, koska kaarevan putken pituus lasketaan kaarevuuden säteen ja kulman avulla kuten kuvasta 20 voidaan havaita. Pinnan laatuna säilytetään edelleen valurauta, mutta seinämän lämpötilan arvo nostetaan 325 kelviniin, joka vastaa suunnilleen myös imuputken ulkopinnasta mitattua lämpötilan arvoa.

Edit Object: Imuputki-lyhyt

Template: PipeRound

Object: Imuputki-lyhyt Long Comment...

Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm	55.619
Diameter at Outlet End	mm	44.869
Length	mm	def
Discretization Length	mm	41
Pipe Elevation Change	mm	ign
Material for Default Surface Roughness		cast_iron
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	325
Wall Temperature Solver Object		ign
Initial State Name		IntakeInit

Main Bend Options

OK Cancel Apply

Kuva 19. Imuputken pääikkuna.

Edit Object: Imuputki-lyhyt

Template: PipeRound

Object: Imuputki-lyhyt Long Comment...

Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Radius of Bend	mm	168.328
Angle of Bend	deg	34.6552

Main Bend Options

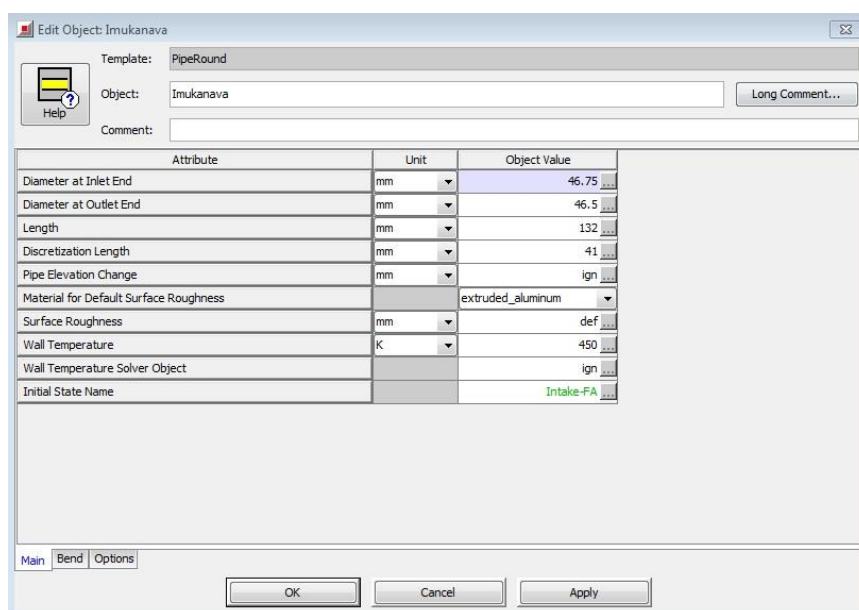
OK Cancel Apply

Kuva 20. Imuputken kaarevuuden määrittäminen.

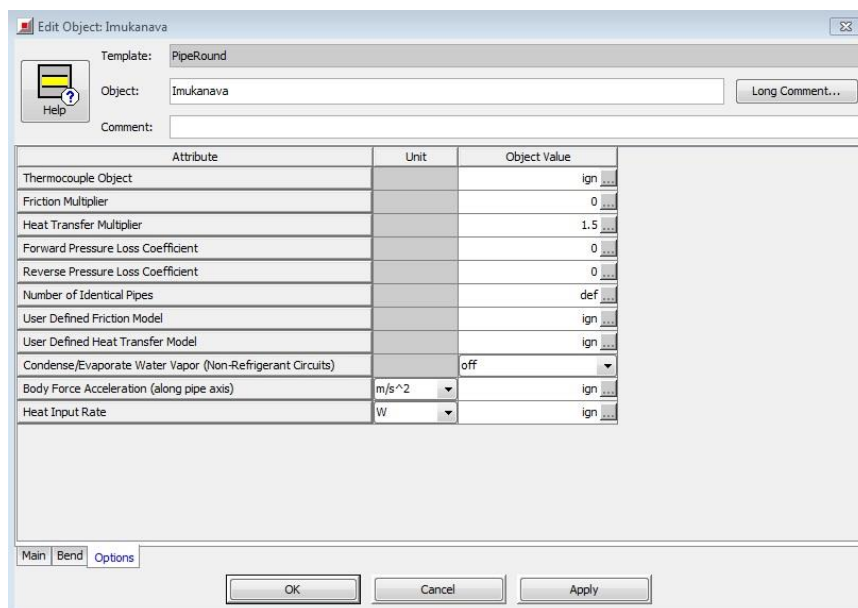


### 7.1.7 Imukanava

Imukanavan mallintaminen aloitettiin valamalla kuminen malli moottorin sylinterikannen imukanavasta. Mallista saatiin mitattua tarvittavat tiedot 3D-mallinnuskuvaa varten, jonka tekemiseen käytettiin Catia V5 -ohjelmistoa. Lopuksi 3D-mallista luotiin simulointiympäristöön virtauskomponentti käyttämällä Gem3D-ohjelmää. Imuputki yksinkertaistettiin käyttämällä sen luomiseen suoraa putkea (kuva 21). Pinnanlaaduksi valittiin extruded\_aluminum, joka kuvaa suhteellisen tasaista pinnanlaatua, sekä seinämän lämpötila nostettiin 450 kelviniin kuvaamaan lämmönsiirtoa kuumista venttiileistä. Kuvasta 22 huomataan myös kitkaan, lämmönsiirtoon ja painehäviöihin tehtävät muutokset, jotta niitä ei oteta virtauksen laskennassa huomioon kahdesti. Kitkan kerroin ja molemmansuuntaiset painehäviökertoimet asetetaan nollaan ja lämmönsiirtokertoimen arvoksi asetetaan 1,5.



Kuva 21. Imukanavan mallintaminen.



Kuva 22. Imukanavan kertoimien muuttaminen.

## 7.2 Polttoaineen ruiskutus

Polttoaineen ruiskutuksessa käytetään InjAFSeqConn-sapluunaa, jota käytetään sekventiaaliseen ruiskutuksen mallintamiseen, jonka toimintaa ohjataan sylinterikohtaisesti. Todellisessa moottorissa polttoaine ruiskutetaan sylinteripuoliskoittain, mutta simuloinnissa asia jätettiin mallintamatta järjestelmän pienen vaikutuksen takia.

### 7.2.1 Määrä

Suuttimen tuottama massavirta on laskettu aikaisemmin esitetyllä laskukaavalla (kaava 11), jonka tulokseksi saadaan 7,6 g/s. Ilma-polttoaineseoksen suhde määritellään tässä tapauksessa lambda-arvolla, jonka arvoksi asetetaan 0,86. Ilman massavirralla pitää valita tunnistin (mflav:57), jonka avulla lasketaan ruiskutettavan polttoaineen määrä. Samaa tunnistinta käyttävien suuttimien määrä pitää ilmoittaa, jotta oikea seossuhde saavutetaan. Kun jokaista tunnistinta kohden on vain yksi suutin, käytetään arvona numeroa 1. Kuvasta 23 nähdään polttoaineen suuttimen määrittämiseen tarvittavat ominaisuudet.

Attributes which have part overrides will have this background color

Attribute	Unit	Object Value
Injector Delivery Rate	g/s	7.6
Fuel Ratio Specification		Lambda
Fuel Ratio		0.86
RLT for Air Mass Flow Rate Sensor		mflav:57
Number of Injectors per Sensor		1
Apply Engine Trapping Ratio to Air Mass Flow Rate		<input type="checkbox"/>

Rate | Timing-General | Initialization | Nozzle (DI Only)

OK Cancel Apply

Kuva 23. Polttoaineen ruiskutuksen määrän asettaminen.

## 7.2.2 Ajoitus

Jokaiselle suuttimelle pitää määrittää sylinteri, johon se on kytketty, jotta laskemisessa käytetty pyörimisnopeustieto, kulma ja seossuhde tiedetään. Mikäli mallinnettavassa moottorissa käytetään suorasuihkutusta, jolloin suutin liitetään suoraan sylinteriin, voidaan kohdassa käyttää arvoa ign. Ruiskutuksen ajoituksen määrittämiseen ilmoitetaan kampikulman asteet puristustahdin yläkuolokohdasta, joko ruiskutuksen aloitus tai lopetushetkeen. Ruiskutuksen aloittamisajankohdaksi määritellään tässä tapauksessa 322 astetta.

Suutin on liitetty imukanavaan, jolloin sen sijainti putkessa pitää määritellä käyttäen arvoja nollasta yhteen. Suuttimen runko on oikeassa moottorissa kiinnitetty imuputken päähän, mutta polttoaineen ruiskutus tapahtuu kuitenkin käytännössä imukanavan alussa, jolloin suuttimen sijaintia kuvaavaksi arvoksi asetetaan nolla. Liitettäessä suutin virtauksenjako komponenttiin, ei sijaintia oteta huomioon, jolloin kyseiseen kohtaan voidaan kirjoittaa ign. Myös ruiskutettavan polttoaineen lämpötila pitää ilmoittaa, jonka arvona käytetään yleisesti 300 kelviniä. Polttoaineena käytettiin bensiiniä, mutta ohjelman kirjastossa on valittavana myös useita muita vaihtoehtoisesti käytettäviä polttoaineita. Höyrystyvän polttoaineen osuudeksi (Vaporized Fuel Fraction) asetetaan 0,3,

joka on ohjelman suosittelema arvo imusarjaruiskuteisille moottoreille. Kuvassa 24 määritetään suuttimen ruiskutuksen ajoitukseen liittyviä ominaisuuksia.

Attributes which have part overrides will have this background color

Attribute	Unit	Object Value
Part Giving Angle (def=Attached Cylinder)		...
Driver Object Giving Angle		ign ...
Injection Timing Angle	deg	322 ...
Injection Timing Flag		injection-start
Injector Location (Pipes only)		0 ...
Injected Fluid Temperature	K	300 ...
Fluid Object		indolene-combust ...
Vaporized Fluid Fraction		0.3 ...

Rate Timing-General Initialization Nozzle (DI Only)

OK Cancel Apply

Kuva 24. Polttoaineen ruiskutuksen ajoituksen määrittäminen.

### 7.3 Imuventtiili

Luotaessa venttiileitä käyttäen ValveCamConn-objektia tarvitaan muun muassa venttiilien ajoituksen tiedot, venttiilin nostoprofiili ja sylinterikannen virtausarvot. Työntötankomoottori voidaan rakentaa ohjelmassa käyttämällä monimutkaisempaa mallia, mutta rakenteen määrittämiseen tarvitsee tehdä erittäin tarkkoja mittauksia, joihin tässä tapauksessa ei ollut mahdollisuutta, joten venttiilin nosto on laskettu nokka-akselin profiilista keinuvivun vipusuhteen avulla. Koska vipusuhte ei ole noston aikana vakio, mitattiin työntötangon ja venttiilin liikkeen välisestä suhteesta todellinen keinuvipusuhte koko noston aikana.

### 7.3.1 Päävalikko

Imuventtiin päävalikossa kuvassa 25 määritellään venttiilin halkaisija, venttiilin ajoitus sekä venttiilivälitys. Discharge Coefficient Reference Area Definition -kohdasta valitaan constant, jolloin virtauksen laskemiseen käytetään referenssi pinta-alana venttiilin halkaisijaa. Cam Timing Anchor Reference -kohdassa valitaan TDCfiring ja Cam Timing Lift Array Reference -kohdassa maxlift, joilla ajoitetaan imuventtiin maksimi noston ajankohta nokka-akselin asteina puristustahdin yläkuolokohdasta.

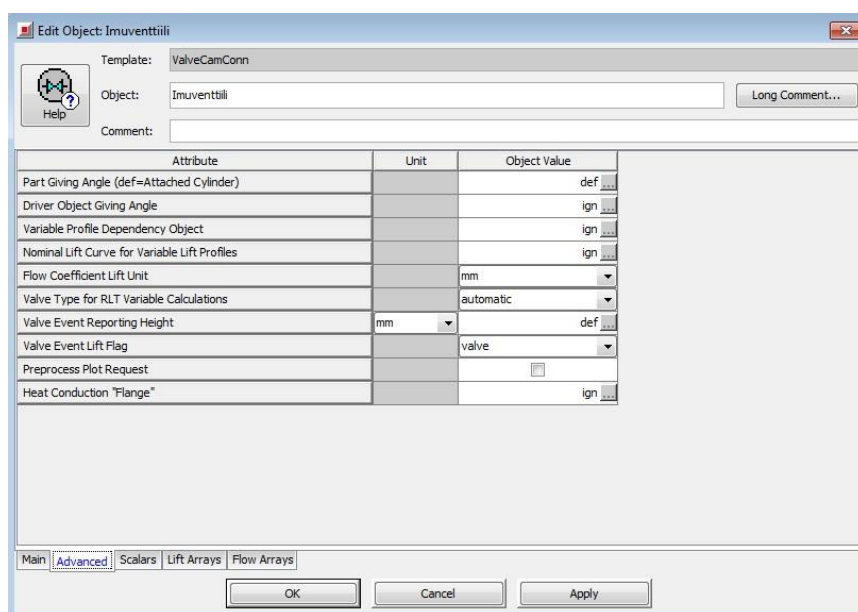
Attribute	Unit	Object Value
Valve Reference Diameter	mm	52.83
Discharge Coefficient Reference Area Definition		constant
Valve Lash	mm	0
Cam Timing Angle	Cam Angle	235
Cam Timing Anchor Reference		TDCfiring
Cam Timing Lift Array Reference		maxlift

Kuva 25. Venttiilin perustietojen määrittäminen.

### 7.3.2 Lisävalikko

Kuvan 26 lisävalikosta määritellään venttiilien tarkempia laskentaan vaikuttavia tekijöitä. Jos venttiilit on liitetty suoraan sylinteriin, voidaan Part Giving Angle säilyttää oletusarvossaan def. Myös Driver Object Angle, Variable Profile Dependency Object ja Nominal Profile lift Curve for Variable Lift Profiles voidaan normaaleissa perus simulointiratkaisuissa jättää huomiotta (ign). Flow Coefficient Lift Unit -kohdassa määritellään yksikkö, jonka mukaan virtausarvot syötetään. Jos asetukseksi valitaan mm, syö-

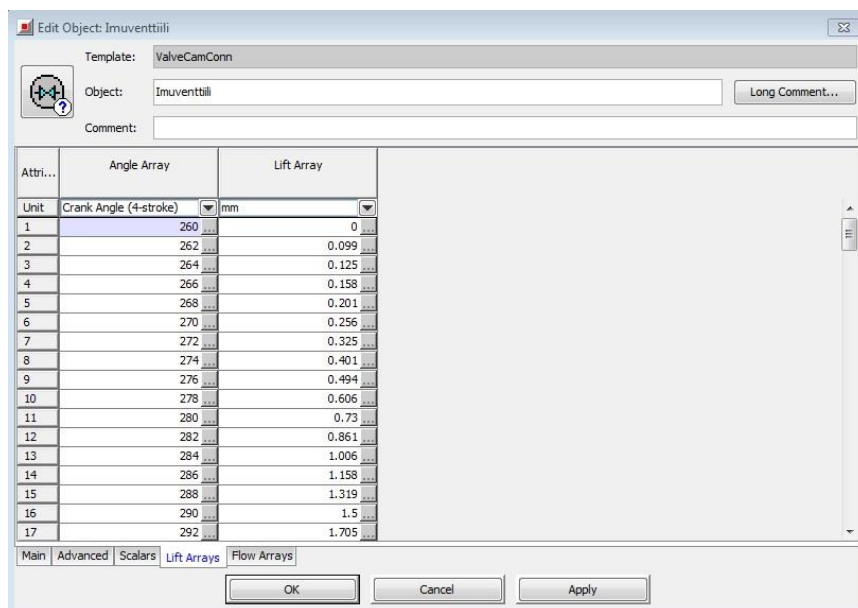
tetään virtausarvot noston funktiona käyttäen noston yksikkönä millimetrejä. Kohdan Valve Type for RLT Variable calculations valikoista voidaan valita automatic, intake tai exhaust, joilla on vaikutusta vain tuloksien esittämiseen. Valitsemalla automatic ohjelma huomaa yleensä automaattisesti, onko kyseessä imu vai pakoventtiili. Kohdasta Valve Event Lift Flag voidaan valita joko valve tai cam. Valitsemalla valve, ohjelma tulkitsee syötetyn venttiilin nostoprofiilin venttiilivälyksen ja noston kertoimen vaikutuksien jälkeen, ja ennen niiden vaikutuksia valitsemalla cam.



Kuva 26. Venttiilin lisätietojen määrittäminen.

### 7.3.3 Venttiilin nosto

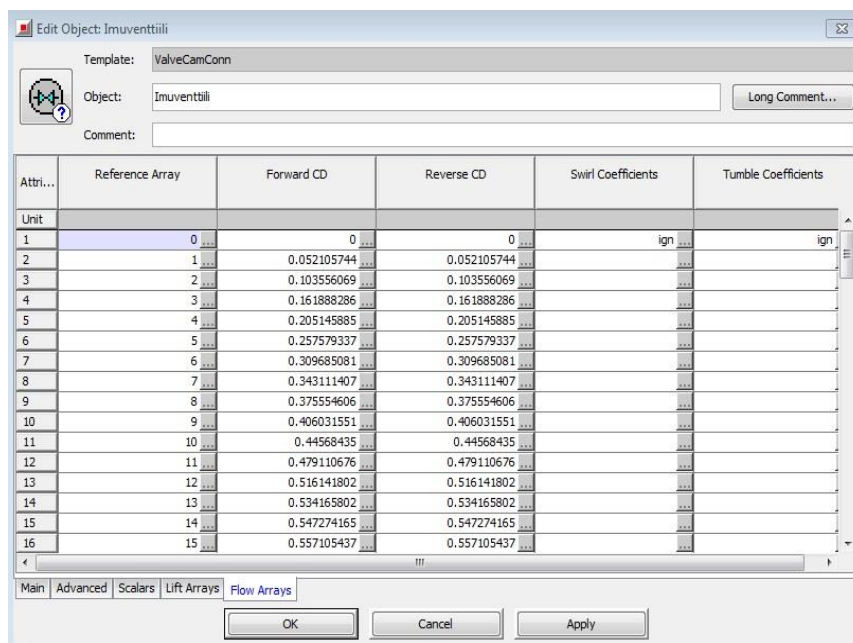
Nostoprofiili voidaan syöttää joko kampikulman tai nokkakulman mukaan käyttäen noston yksikkönä millimetrejä tai tuumia. Nostoprofiili pitää alkaa nolasta ja loppua nolnaan ettei venttiili jää vuotamaan. Nostoprofiili voidaan myös syöttää käyttämällä ulkopuolista lähdettä kuten esimerkiksi käyttämällä Excel-tiedostoa. Kuvassa 27 nähdään venttiilin nosto millimetreinä kampikulman suhteen.



Kuva 27. Venttiilin noston määrittäminen.

#### 7.3.4 Virtausarvot

Syötettäessä virtausarvot joko venttiilin noston suhteen tai käyttämällä arvoa jakamalla venttiilin nosto venttiilin referenssihalkaisijalla tulee virtausarvot alkaa nolasta ja arvojen tulee myös kasvaa monotonisesti. Kuvassa 28 virtausarvot ovat syötetty venttiilin noston suhteen yhden millimetrin välein.

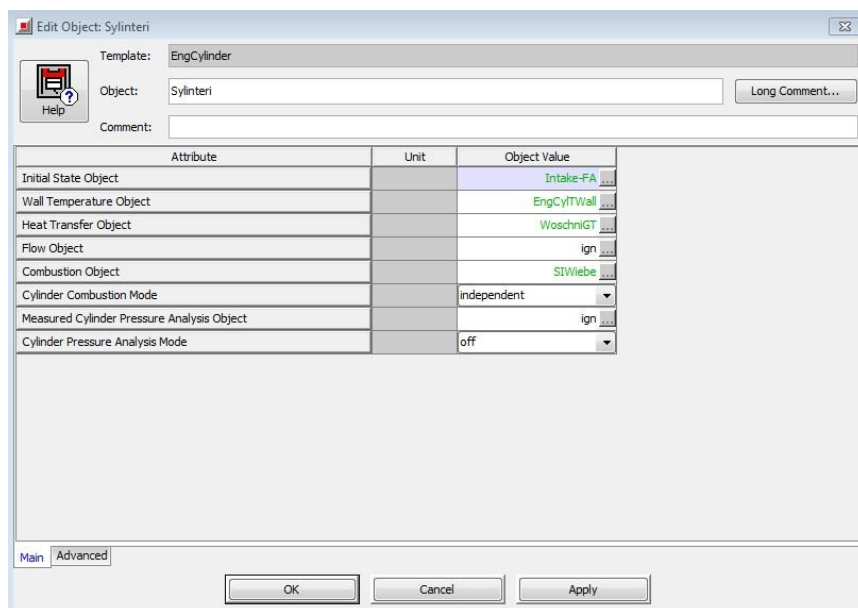


Kuva 28. Virtausarvojen määrittäminen.

## 7.4 Sylinteri

Kuvan 29 sylinteriobjektin määrittäksessä käytetään pääasiallisesti referenssiobjekteja kuten sylinterin seinämien lämpötilojen, lämmönsiirron ja palamisen määrittämiseksi. Sylinterin alkuolosuhteena voidaan käyttää ilmaa, kuten moottorin imupuolenkin virtausobjekteissa, mutta tässä tapauksessa olosuhteiksi on määritetty polttoaineen ja ilman seos, jolla ei kuitenkaan ole tuloksien kannalta merkitystä vakaan tilan simuloinneissa.

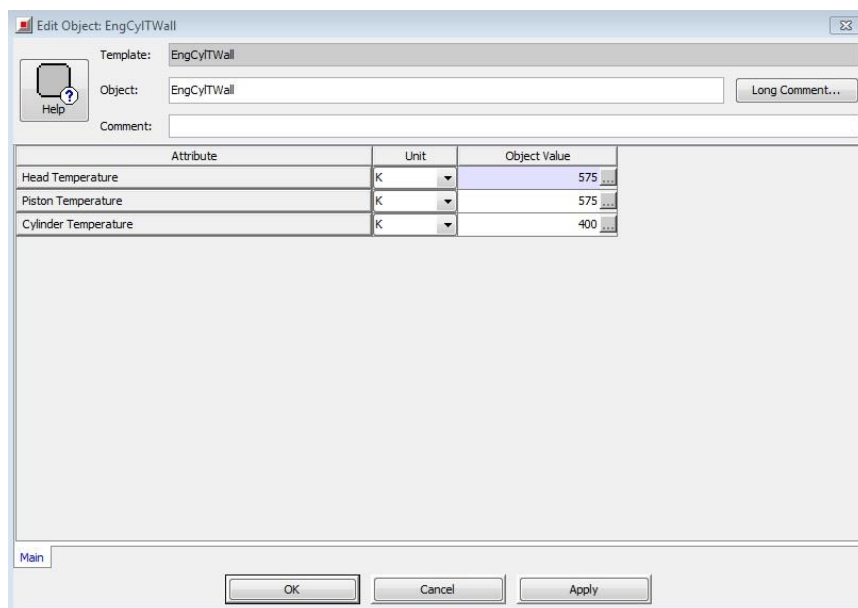




Kuva 29. Sylinterin määrittäminen.

#### 7.4.1 EngCylTWal

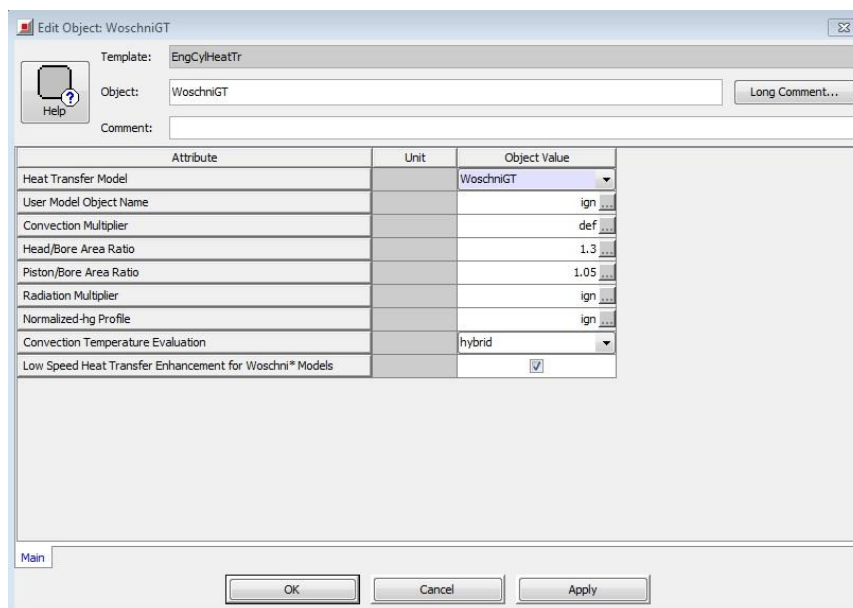
Sylinterikannen, männän ja sylinterin seinämien pintojen lämpötilan määrittämiseksi käytetään kuvassa 30 EngCylTWal-referenssiobjektia. Useimpien moottorin suorituskyvyn ja akustisen analysoinnin simuloinnin tekemiseen riittää kyseisten kolmen arvon määrittäminen.



Kuva 30. Sylinterin seinämien lämpötilat.

#### 7.4.2 WoschniGT

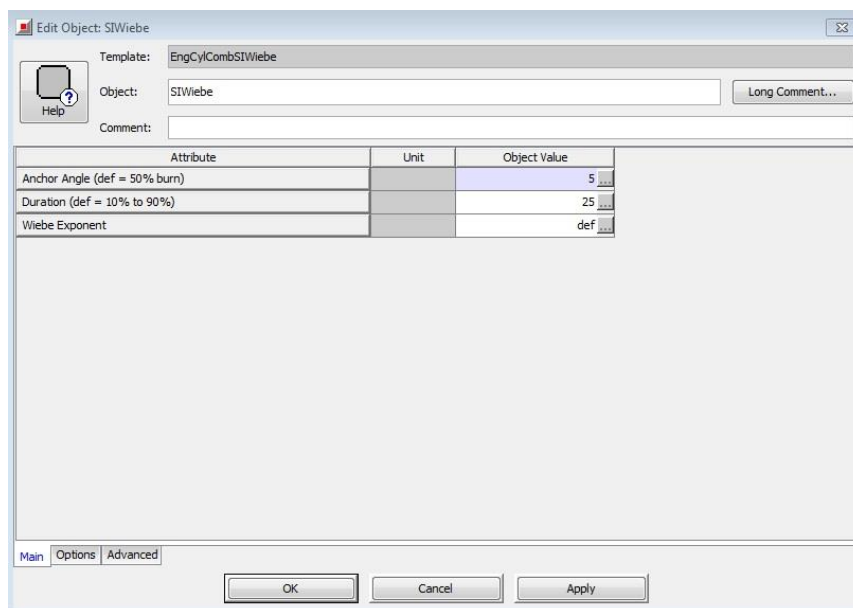
Kuvassa 31 lämmönsiirtomalliksi valitaan WoschniGT, jota käytetään kuvaamaan sylinterin lämmönsiirron ominaisuuksia kaasun ja palotilan seinämien välillä. Objektiin tulee määrittää palotilan ja sylinterin porauksen pinta-alan suhde sekä männän pinnan sekä sylinterin porauksen pinta-alan suhde, muissa kohdissa käytetään ohjelman oletusasetuksia.



Kuva 31. Sylinterin lämmönsiirron määrittäminen.

#### 7.4.3 SIWiebe

Kuvassa 32 palamisen määrittämiseen käytetään EngCylCombSIWiebe-referenssiobjektia, johon tarvitsee määrittää kampikulman asteet yläkuolokohdasta 50:n % palamiselle, palamisaika kampikulmana 10–90 % palamiselle, sekä wiebe-exponentti (def = 2). Ilman kunnollista sylinteripaineen mittausta on vaikea tietää käytettävien arvojen suuruutta, joten arvoina käytetään arvioita ja iteroinnin tuloksia.



Kuva 32. Palamisen määrittäminen.

## 7.5 Pakoventtiili

Pakoventtiilin määrittämisessä käytetään samaa periaatetta kuin imuventtiilinkin luomisessa, käyttäen kuitenkin eri venttiilin halkaisijaa, maksiminoston ajoitusta sekä eri virtausarvoja. Imu- ja pakoventtiilin nostoprofiili oli kyseisessä moottorissa identtiset joten samoja arvoja voidaan käyttää molempien venttiileiden määrittämisessä. Kuvassa 33 nähdään pakoventtiilin mallintamiseen käytetyt arvot.

Template: ValveCamConn

Object: Pakoventtiili

Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Valve Reference Diameter	mm	40.64
Discharge Coefficient Reference Area Definition		constant
Valve Lash	mm	0
Cam Timing Angle	Cam Angle	125
Cam Timing Anchor Reference		TDCFiring
Cam Timing Lift Array Reference		maxlift

Main | Advanced | Scalars | Lift Arrays | Flow Arrays

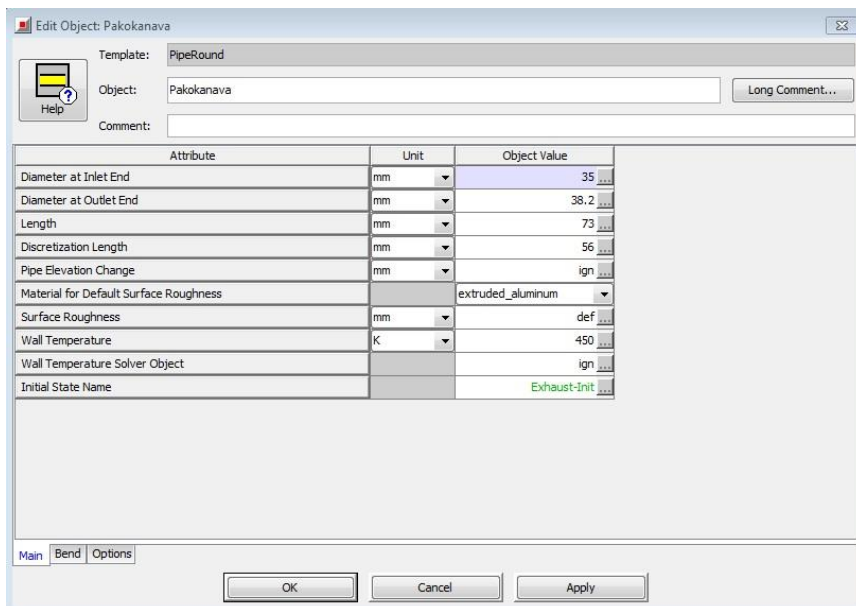
OK Cancel Apply

Kuva 33. Pakoventtiilin määrittäminen.

## 7.6 Pakopuoli

### 7.6.1 Pakokanava

Pakokanavan mallintaminen (kuva 34) tehtiin käyttämällä samaa prosessia kuin imu-kanavankin mallintamisessa. Kanavien eroavaisuuksia ovat putken fyysiset mitat, diskretisoinnin pituus, seinämän lämpötila ja alkuolosuhteet. Pakokanavan seinämän lämpötilana käytetään kiinteää arvoa, koska nestejäähdytys pitää sylinterikannen lämpötilat melko tasaisena, jolloin seinämän lämpötilan laskuria käytetään vasta pakoputkistossa.



Template: PipeRound

Object: Pakokanava

Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm	35
Diameter at Outlet End	mm	38.2
Length	mm	73
Discretization Length	mm	56
Pipe Elevation Change	mm	ign
Material for Default Surface Roughness		extruded_aluminum
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	450
Wall Temperature Solver Object		ign
Initial State Name		Exhaust-Init

Main Bend Options

OK Cancel Apply

Kuva 34. Pakokanavan määrittäminen.

Pakopuolen läpi virtaava pakokaasu määritellään käyttämällä Exhaust-Init-referenssiobjektia, jossa lämpötilana käytetään tässä tapauksessa 900:aa kelviniä ja putkiston absoluuttisena paineena 1,2:ta baaria. Virtaavan aineen koostumukseksi valitaan ohjelman valikosta BurnedGas, joka kuvaa palamisen seurauksena syntyvää pakokaasua. Käytettävillä arvoilla ei ole suurta merkitystä vakaan tilan laskennassa, koska ohjelma käyttää arvoja vaan alkuolosuhteina ja laskee pakopuolella vallitsevat todelliset olosuhteet muista muuttujista. Laskennan alkuolosuhteiden määrittämistä havainnollistetaan kuvassa 35.

Edit Object: Exhaust-Init

Template: FluidInitialState

Object: Exhaust-Init

Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Pressure (Absolute)	bar	1.2
Temperature	K	900
Composition		BurnedGas

Main | Altitude and Humidity

OK Cancel Apply

Kuva 35. Pakopuolen laskennan alkuolosuhteet.

### 7.6.2 Pakokanavan ja primäärin liitântä

Jokaisessa virtauskomponentissa, jossa käytetään seinämän lämpötilan laskuria pitää erottaa kuvan 36 nocond-yhteysobjektilla osista, joissa seinämän lämpötilana käytetään muuttumatonta vakio seinämän lämpötilan arvoa. Yhteysobjekti estää lämmönsiirtymisen pakokanavasta primäärin, jolloin tässä tapauksessa seinämän lämpötilan laskemiseen ei vaikuta lämmönsiirtyminen pakokanavasta.

Edit Part: 19

Template: OrificeConn Part: 19

Object: nocond Create Parameter Object Edit Object

Object Comment:

Comment:

Attribute	Unit	Object Value	Part Override
Hole Diameter	mm	def	...
Number of Holes		def	...
Forward Discharge Coefficient		def	...
Reverse Discharge Coefficient		def	...
Hole Thickness	mm	def	...
Rounded Corner Radius (only if Discharge Coefficient = "def")	mm	ign	...

Main Options Plots

OK Cancel Apply

Kuva 36. Pakokanavan ja primäärin välinen liitos.

### 7.6.3 Primäärarit

Moottorin kaikkien kahdeksan primäärien mallintamiseen tarvittiin putkien halkaisija, pituudet ja seinämän lämpötilan laskuria varten putkien seinämän halkaisija. Putket mallinnettiin käyttämällä suoraa putkea, koska laskenta-aika on tällä tavoin lyhyempi ja simuloinnissa huomattiin, että tuloksiin vaikutti huomattavasti enemmän putken pituus kuin sen muoto, jolloin monimutkaisemmasta muotoilusta luovuttiin. Primäärarit ovat toisensa kanssa identtisiä muilta osin paitsi pituuden suhteen, jolloin kaikkien primäärien esittely ei ole tarpeen, jolloin kuvassa 37 havainnollistetaan primääriputkia vain ensimmäisen sylinterin primäärillä, jonka pituus on 806 millimetriä.



Template: PipeRound

Object: Primääri1

Comment:

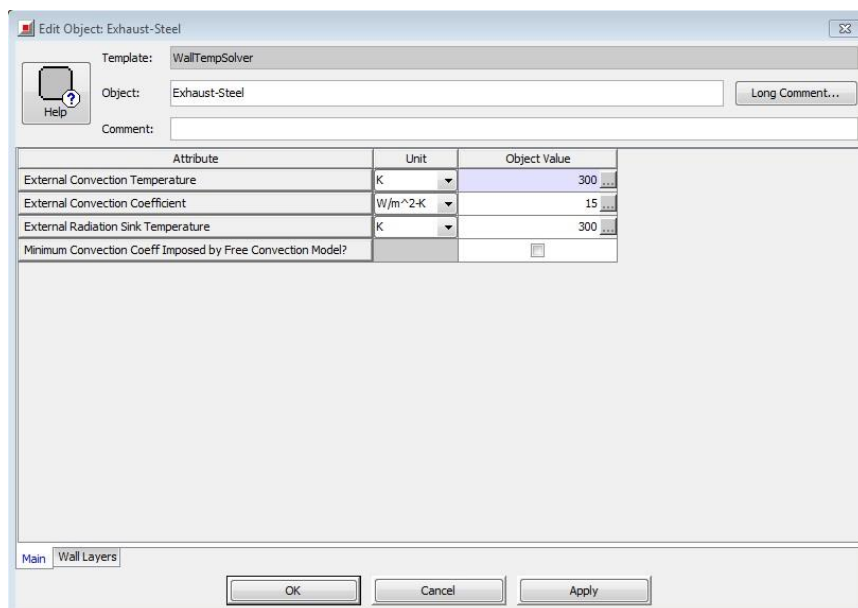
Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm	37
Diameter at Outlet End	mm	37
Length	mm	806
Discretization Length	mm	56
Pipe Elevation Change	mm	ign
Material for Default Surface Roughness		steel
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	1000
Wall Temperature Solver Object		Exhaust-Steel
Initial State Name		Exhaust-Init

Main Bend Options

OK Cancel Apply

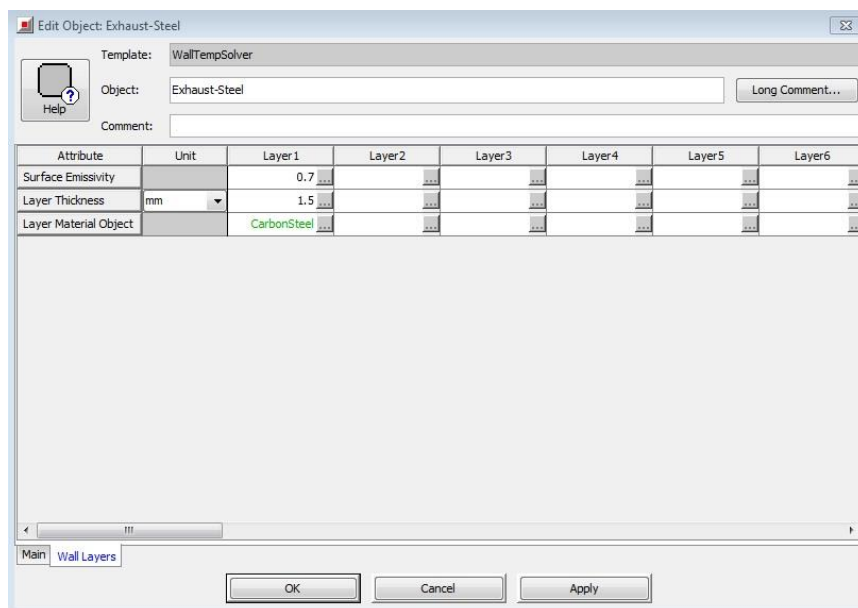
Kuva 37. Ensimmäisen sylinterin primääriputki.

Pakoputkiston seinämän lämpötilan laskuria käytettäessä pitää laskurille antaa jokin lähtöarvo, josta laskenta aloitetaan. Vakaan tilan simuloinneissa käytetään pakopuolella putken seinämän lämpötilan lähtöarvona usein 1000 kelviniä. Kuvan 38 WallTemp-Solver-objektissa pitää määrittää ympäröivän ympäristön lämpötila lämmönsiirron vaikutuksesta (External Convection Temperature), lämmönsiirtoa kuvaava arvo (External Convection Coefficient) sekä ympäröivän ympäristön lämpötila säteilyn vaikutuksesta (External Radiation Sink Temperature).



Kuva 38. Lämpötilalaskurin pääikkuna.

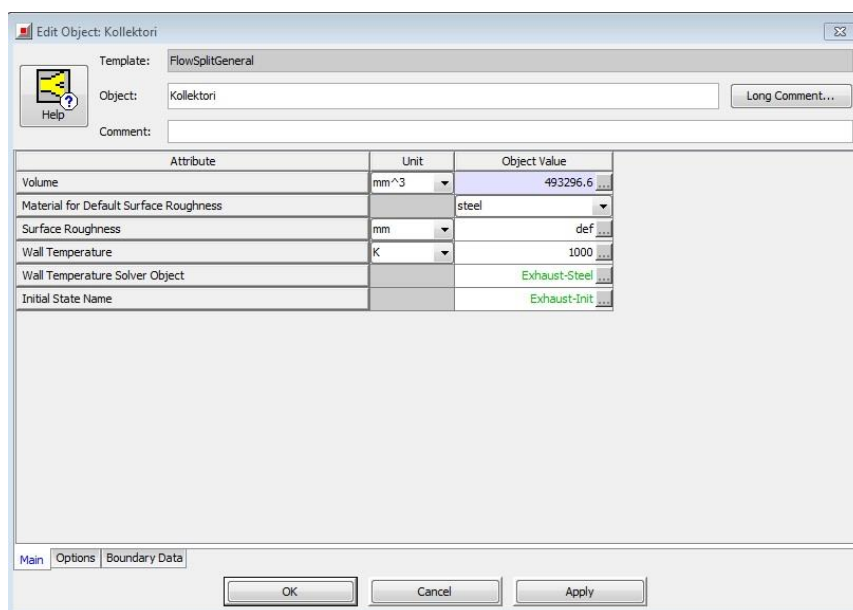
Kuvassa 39 määritellään seinämän asetuksista pinnan emissiivisyys (Surface Emissivity), seinämän paksuus (Layer Thickness) sekä seinämän materiaali (Layer Material Object), joksi valitaan ohjelman kirjastosta teräs (CarbonSteel), jonka ominaisuudet ovat valmiiksi määritetyt.



Kuva 39. Seinämän asetukset.

#### 7.6.4 Kollektori

Kollektori on mallinnettu käyttämällä kuvan 40 mukaista normaalia virtauksenjakokomponenttia. Jakokomponentti yhdistää primääriputket yhteiseen tilavuuteen, josta pakokaasu jatkaa matkaansa edelleen pakoputkeen. Myös virtauksenjakokomponenteissa käytetään seinämän lämpötilan laskuria. Seinämän lämpötilana käytetään samaa lähtöarvoa kuin muissa putkissa, joissa käytetään seinämän lämpötilan laskuria.



Kuva 40. Kollektori mallintaminen.

### 7.6.5 Pakoputki

Moottorin pakoputki jaettiin seitsemään eri osaan, jotta siihen mahdollisesti tehtävien muutoksien vaikutuksia olisi selkeämpi tehdä ja tutkia. Esimerkiksi yhdysputken eri etäisyyksien vaikutusten analysoiminen on tällöin helpompaa. Pakoputkien eri osat eivät eroa toisistaan kuin pituuksien suhteen, joten kuvassa 41 pakoputkisto havainnollistetaan vain käyttämällä putkiston ensimmäistä osaa.

Template: PipeRound

Object: Pakoputki1

Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm	73
Diameter at Outlet End	mm	73
Length	mm	470
Discretization Length	mm	55
Pipe Elevation Change	mm	ign
Material for Default Surface Roughness		steel
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	1000
Wall Temperature Solver Object		Exhaust-Steel
Initial State Name		Exhaust-Init

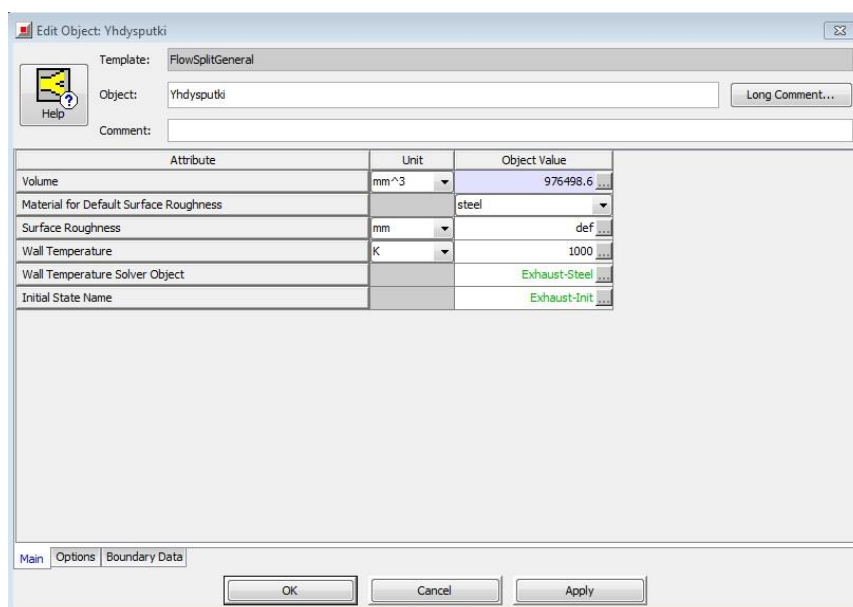
Main Bend Options

OK Cancel Apply

Kuva 41. Pakoputken ensimmäinen osa.

#### 7.6.6 Yhdysputki

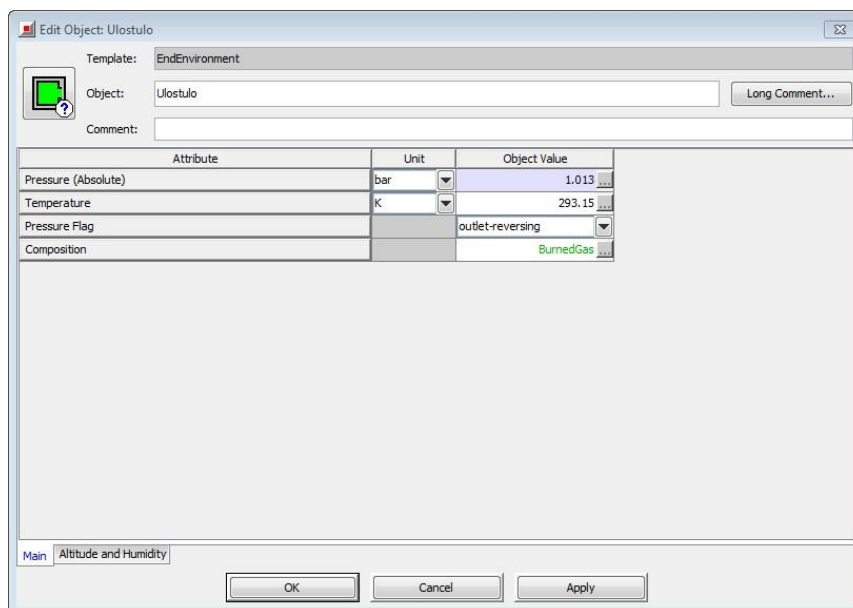
Yhdysputki yhdistää pakoputket hetkellisesti yhteen, joka tasoittaa paine-eron pakoputkien välillä ja parantaa näin ollen sylinterin kaasunvaihtoa. Putkien virtauksen yhdistämisessä käytetään normaalia flowsplit-objektia. Yhdysputken jälkeen pakoputket jatkuvat edelleen omina putkina ulostuloon saakka. Kuvasta 42 nähdään yhdysputken pääikkunan asetukset.



Kuva 42. Yhdysputki.

### 7.6.7 Loppuympäristön mallinnus

Objektien viimeisenä osana mallinnetaan ulostulon loppuympäristön vallitsevat olosuhteet, josta moottorin läpi virranneet kaasut pääsevät takaisin ulkoilmaan. Loppuympäristön objektin luomisessa käytetään samaa ympäristön lämpötilaa ja painetta kuin sisään tulossa. Kuvassa 43 havainnollistetaan loppuympäristö-objektin luomista.



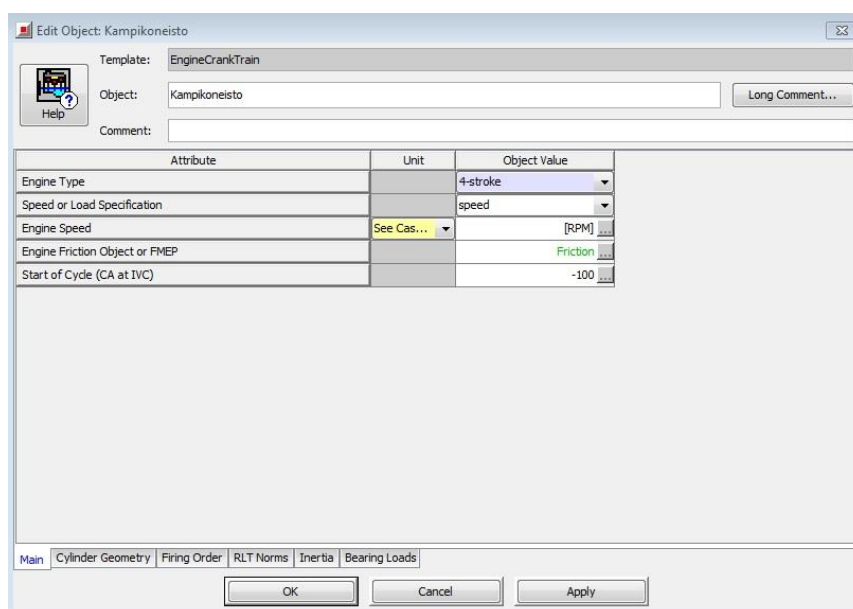
Kuva 43. Ulostulo-objektin määrittäminen.

Pressure Flag -valikosta tulee ulostulon ympäristöä mallinnettaessa valita outlet-reversing. Valinta merkitsee, että jos kaasua virtaa takaisin pakoputkeen, käytetään kaasun lämpötilana pakokaasun lämpötilaa eikä ympäristön lämpötilaa. Ympäristön koostumukseksi valitaan ohjelman kirjastosta "BurnedGas", joka kuvaa palaneen polttoaineen ja ilman sekoitusta.

## 7.7 Kampikoneisto

Viimeisenä luotava kohde on moottorin kampikoneisto, jossa määritellään moottorin tyyppi, sylinterijärjestys, sytytysjärjestys, ja moottorin muiden osien kuten lohkon ja kampiakselin ominaisuudet. Kuten kuvasta 44 havaitaan, moottorin tyyppiä valitaan nelitahtinen, sekä moottorin suorituskyvyn laskentamalliksi speed. Valittavana on speed- ja load-tilat, joista speed-tilaa käytetään yleisemmin moottorin suorituskyvyn simuloinnin yhteydessä. Speed-tilassa ratkaisija laskee moottorin tuottaman vääntömomentin pyörintänopeuden mukaan ja load-tilassa pyörintänopeuden sekä vääntömomentin moottorin kuormituksen määrästä.

GT-Powerissa luodaan parametreja kirjoittamalla nimi hakasuikeiden sisälle, jolloin sen arvo määritellään ohjelman tapaus valikkoon (Case Setup). Moottorin pyörintänopeuden parametri luodaan kirjoittamalla [RPM]-objektiin, jolloin laskennassa käytettävät pyörintäarvot määritellään tapaus valikkoon. Lasken aloituksen ajankohta määritellään lisäämällä arvo kohtaan Start of Cycle. Arvona käytetään kampikulman asteita ennen sytytystä, jonka takia arvon tulee olla negatiivinen. Arvon tulee myös olla yhtä suuri tai pienempi kuin kampikulman ja puristustahdin yläkuolokohdan väliset asteet imuventtiilin sulkeutumishetkellä, mutta kuitenkin ennen sytytystä. Moottorin kitkaominaisuudet määritellään kuvassa 45 käyttäen Friction-referenssiobjektia.



Kuva 44. Kampikoneiston asetusten määrittäminen.

### 7.7.1 Kitka

Kitka-arvoilla on suuri vaikutus simulointituloksiin, jolloin jos käytössä ei ole mitattuja arvoja, suositellaan käytettäväksi ohjelman yleisiksi arvoiksi suosittelemia arvoja. Kitkaobjektin määrittäminen sisältää kampikoneistosta, männistä ja venttiilikoneistosta aiheutuvat kitkat. Jatkuvan kitkahäviön (Constant part of FMEP) arvoksi asetetaan 0,5, sylinteripaineen kitkan kertoimeksi (Peak Cylinder Pressure Factor) 0,005 ja männän keski-



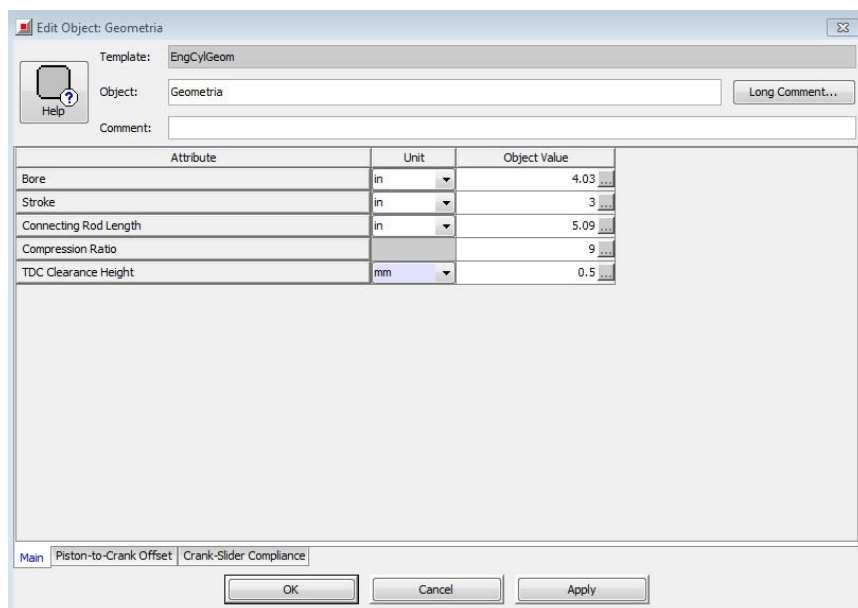
nopeuden kertoimeksi (Mean Piston Speed Factor) 0,09. Männän keskinopeuden neliön kertoimeksi (Mean Piston Speed Squared Factor) asetetaan 0, koska kyseistä arvoa tulee käyttää jos muut arvot ovat suositeltujen rajojen sisällä. Mikäli moottori halutaan hidastaa pysähdyksiin asti, voidaan kohdassa Engine Speed Upon Entering Friction Transition Band käyttää myös numeerista arvoa, joilla voidaan vaikuttaa tulosten tasaisuuteen pyörintänopeuden hidastuessa lähelle nollaa.

Attribute	Unit	Object Value
Constant part of FMEP	bar	0.5
Peak Cylinder Pressure Factor		0.005
Mean Piston Speed Factor	bar/(m/s)	0.09
Mean Piston Speed Squared Factor	bar/(m/s...)	0
Engine Speed Upon Entering Friction Transition Band	RPM	def

Kuva 45. Kitkahäviöiden määrittäminen.

### 7.7.2 Geometria

Sylinterin geometrian objektin täyttämiseen tarvittavat tiedot mitattiin moottorista. Sylinterin poraukseksi mitattiin 4,03 tuumaa, iskupituudeksi 3 tuumaa, kiertokangen pituudeksi 5,09 tuumaa, puristussuhteeksi 9:1 ja männän yläpinnan yläkuolokohdassa sekä sylinterikannen pinnan väliseksi välykseksi 0,5 millimetriä. Sylinterin geometria määritellään kuvassa 46.



Kuva 46. Sylinterin geometrian määrittäminen.

### 7.7.3 Sytytysjärjestys

Sytytysjärjestys määritellään kirjoittamalla valikkoon sylinterin numerot ja sytytyksen aikavälit. Ensimmäisen sylinterin sytytyksen aikavälin astemääräksi kirjoitetaan 0, ja seuraavien sylintereiden aikavälit kuvaavat sytytyksen aikaväliä sylintereiden välillä kampikulman asteina. Tärkeä askel rakennettaessa moni sylinteristä moottoria on varmistaa, että sylinterit on kytketty kampikoneistoon oikeassa järjestyksessä. Simulointimallin sylinterit tulee kytkeä aloittaen ensimmäisestä sylinteristä. Oikean kytkemisjärjestyksen voi tarkastaa myös linkkinuolesta, jolla sylinteri liitetään kampikoneistoon, jolloin numeron pitäisi olla sama kuin liitetyn sylinterin numero. Kuvassa 47 määritellään kyseisen moottorin sytytysjärjestys eli 1-3-7-2-6-5-4-8 ja sytytyksen aikaväli, 90 astetta.

Edit Object: Kampikoneisto

Template: EngineCrankTrain

Object: Kampikoneisto Long Comment...

Comment:

Attribute	Unit	1	2	3	4
Cylinder Number		1	3	7	2
Firing Intervals	deg	0	90	90	90

Main | Cylinder Geometry | **Firing Order** | RLT Norms | Inertia | Bearing Loads

OK Cancel Apply

Kuva 47. Sytytysjärjestyksen määrittäminen.

## 8 Optimointi

GT-Suitessa on tarjolla kaksi eri optimointityökalua, joista on apua esimerkiksi mallia kalibroidessa tai kehitettäessä moottorin suorituskykyä. Optimointityökalut nopeuttavat näitä prosesseja, koska käyttäjän ei tarvitse manuaalisesti tutkia lähtöarvojen muutoksien vaikutuksia tuloksiin, vaan ohjelma tekee sen käyttäjän puolesta annettujen ehtojen mukaisesti. Käytettävät optimointityökalut ovat suora optimointi ja DOE (Design of experiments). Tässä työssä käytettiin optimointityökaluna suoraa optimointia, joten tarkempi tutustuminen DOE-menetelmän toimintaan jätetään vähemmälle huomiolle.

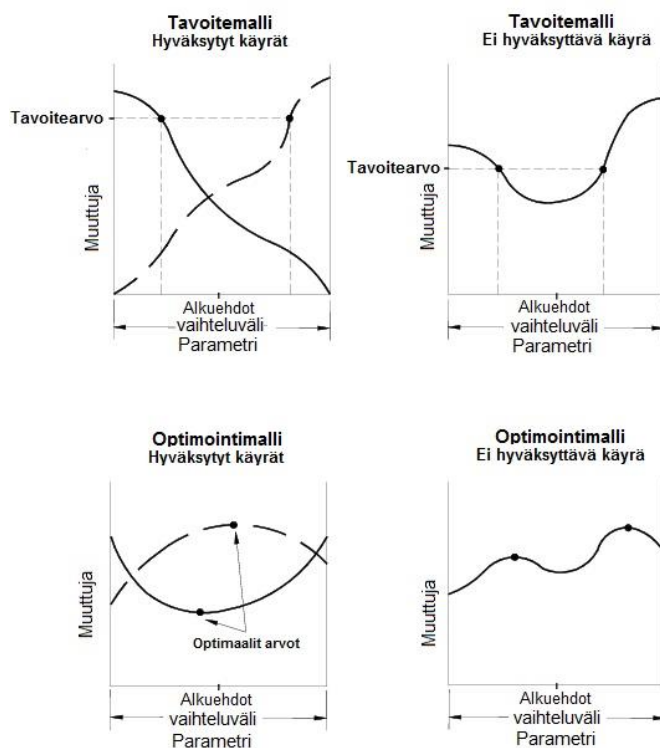
### 8.1 DOE

DOE-menetelmän toiminta perustuu valittujen parametrien ratkaisemiseen eri yhdistelmiä käyttämällä ilman alkuperäistä optimointitavoitetta, eli käyttäjä valitsee itse minikä muuttujan suhteen optimoinnin tulos esitetään. DOE-menetelmä perustuu eri koodiin kuin ohjelman oma suora optimointi, joten lopputuloksissa saattaa esiintyä pieniä eroja optimointityökalujen välillä. DOE-optimointityökalun etuna voidaan pitää sen parempaa soveltuvuutta suurempien parametrijoukkojen käsittelemiseen.

### 8.2 Suora optimointi

Suoran optimointityökalun avulla voidaan optimoida valittua muuttujaa, käyttämällä yhden tai useamman parametrin arvoja. Optimointityökalu voi ratkaista parametrien arvoja muuttamalla, joko määritetyn tavoitearvon tai optimoida mahdollisimman pienen tai suuren muuttujan. Optimoinnin toiminta perustuu iterointiprosessiin, jossa simuloinnin aikana ratkaisija laskee määritetyllä vaihteluvälillä parametria kunnes simulaatio saavuttaa vakaan tilan (yksi iterointi), jonka jälkeen takaisin kytketään yksi tai useampi parametri. Tämä prosessi toistetaan, kunnes optimaalinen arvo tai tavoitearvo on saavutettu. Laskennan päätyttyä ohjelma ilmoittaa suoraan optimaaliset parametrin tai parametrien arvot. Työkalua voidaan käyttää vain vakaan tilan (steady-state) simuloinnissa.

Optimointityökalu on suunniteltu siten, että se voi löytää oikean ratkaisun vain jos ratkaisu on yksikäsitteinen. Tämä tarkoittaa sitä, että jos optimoinnissa lasketaan tavoitearvoa (Target), muuttujan on oltava joko monotonisesti kasva tai monotonisesti laskeva parametrin vaihteluvälillä. Kun optimoinnin avulla etsitään joko mahdollisimman pientä (OptimumMin) tai suurta (OptimumMax) muuttujan arvoa, tarvitsee muuttujalla olla vaihteluvälillä vain yksi pienin tai suurin arvo. Jos nämä ehdot eivät täyty, tarvitsee parametrin vaihteluväliä kaventaa. Kuvassa 48 havainnollistetaan optimoinnissa määriteltävän vaihteluvälin oikeaoppisen ja virheellisen asettamisen vaikutusta laskentaan.



Kuva 48. Parametrin vaihteluvälin oikea ja väärä määrittäminen.

Laskettaessa optimaalisen pientä tai suurta muuttujan arvoa, suositellaan valittavaksi laskentaan vaikuttavia parametreja enintään neljä, koska laskenta-aika kasvaa parametrien määrän kasvaessa huomattavasti. Tavoitemallia käytettäessä ohjelma sallii vain yhden parametrin käyttämisen kerrallaan.

### 8.3 Nokka-akselin optimointi

Nokka-akselin optimointiin käytetään suoraa optimointia, jonka avulla etsitään optimaalisen suurta arvoa. Optimoitavaksi muuttujaksi valitaan teho (kw) ja parametreiksi imu- ja pakoventtiilin ajoitus, venttiilin nosto sekä aukioloaika. Nokka-akselin muutoksella haluttiin kasvattaa maksimi huipputehoa, jolloin optimoitavaksi alueeksi asetettiin 5000–6500 kierrosta minuutissa. Tapaus valikosta on asetettu askelväliksi 100 kierrosta minuutissa, jolloin ohjelma laskee optimaalista yhdistelmää sadan kierroksen välein kunnes arvot ovat löydetty. Laskennan päätyttyä ohjelma ilmoittaa parametrien arvot, joita käyttämällä avulla saavutetaan paras mahdollinen tulos optimoidulla kierrosalueella.

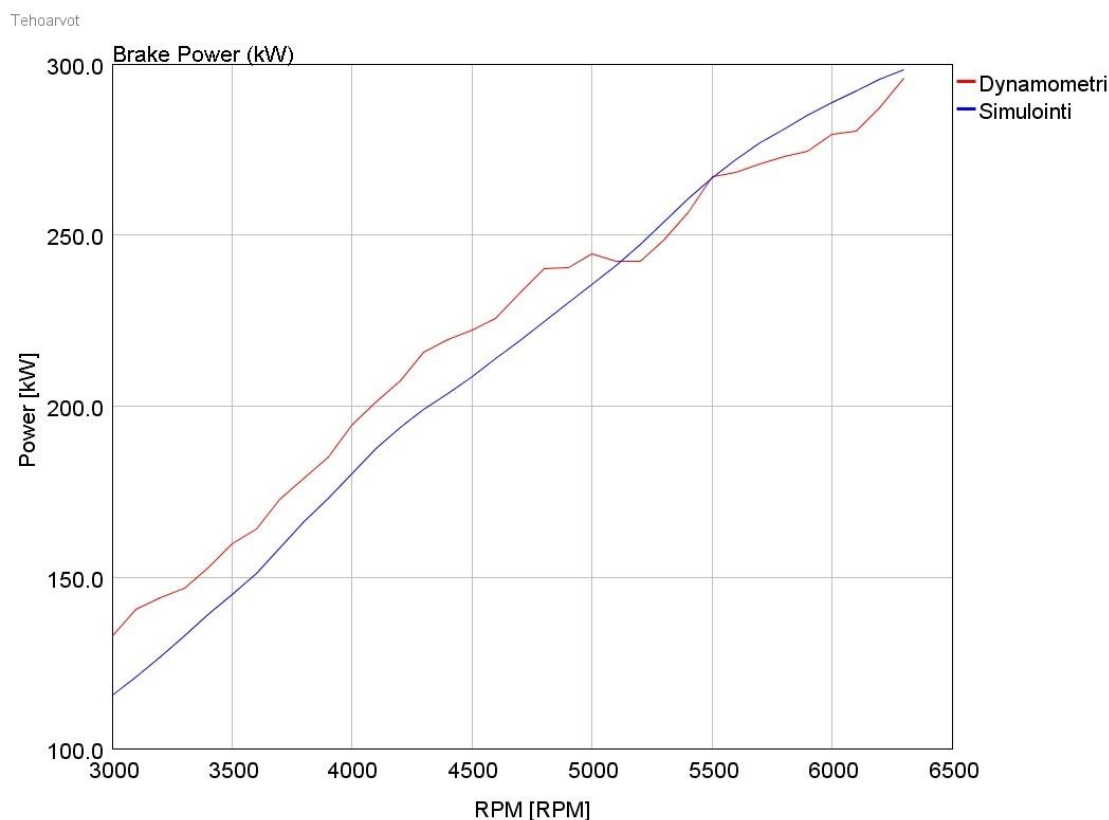
## 9 Tulokset

### 9.1 Simulointi

Moottoridynamometrissä mitatuilla arvoilla saattaa olla pientä heittoa mittauskertojen välissä, koska dynamometrin mittapää ei ollut lämpötilakalibroitu, jolloin mittapään lämpötilan kasvaessa sen tulokset muuttuivat hieman. Mittapään kalibroitua ei myöskään suoritettu mittausten välissä. Mittauksen virhemarginaalin suuruus saattoi siis vaihdella eri mittauskertojen välillä, mutta sen merkitys todettiin kuitenkin tämän tapauksen suhteen niin pieneksi, jolloin sen vaikutus jätettiin huomioimatta.

Simulointitulokset ovat sijoitettu samaan kuvaajaan oikeasta moottorista mitattujen tulosten kanssa (kuva 49). X-akselille on sijoitettu mittausalue 3000 kierroksesta 6300 kierrokseen minuutissa. Y-akselilla on simuloinnin ja oikean moottorin tuottama teho kilowateissa. Punainen käyrä kuvaa moottoridynamometrillä mitattuja arvoja oikeasta moottorista ja sininen käyrä esittää simulointiohjelmistolla saatuja laskentatuloksia.

Käyristä voidaan todeta, että ne ovat hyvin samansuuntaisia, mutta varsinkin kierrosalueen alapäässä moottoridynamometrin avulla mitatut tehoarvot ovat tasaisesti simulointituloksia korkeammalla. Noin 5400 kierroksen kohdalla käyrät tasoittuvat vähitellen ja 6300 kierroksen kohdalla saavutetut huipputehot ovat jo lähes samalla tasolla.

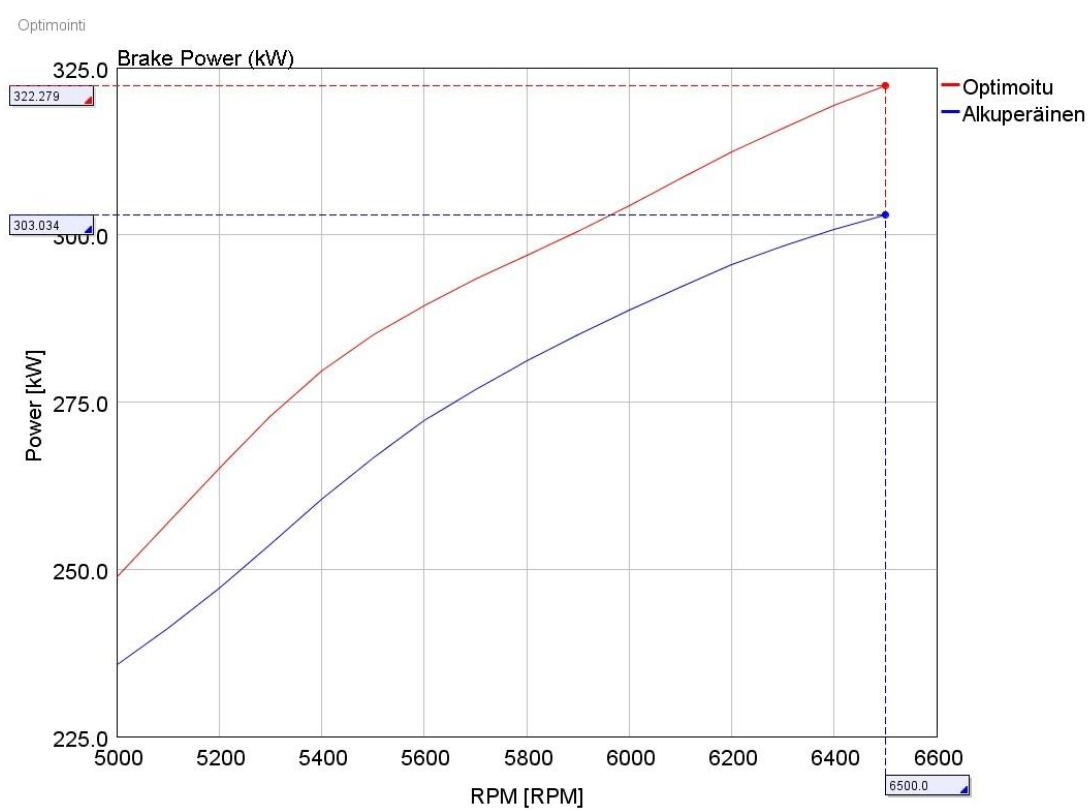


Kuva 49. Mitattujen simuloitujen tulosten vertailu.

## 9.2 Optimointi

Tuloksissa vertaillaan moottorin alkuperäisellä kokoonpanolla saatuja simulointituloksia optimoidulla nokka-akselilla saavutettujen simulointituloksien kanssa (kuva50). Kuvaajan sininen käyrä kuvaa mallin alkuperäisellä kokoonpanolla saavutettuja tuloksia ja punainen käyrä esittää optimoitua nokka-akselia käyttämällä saatuja simulointituloksia. Nokka-akselin optimoinnilla tavoiteltiin huipputehon kasvua kierrosalueen yläpäässä. Kuvaajasta voidaan todeta, että uudella nokka-akselilla saavutettiin huomattava huipputehon lisäys tavoitellulla kierrosalueella.

Tuloksia voidaan pitää järkevänä, koska käytettävä sylinterikansi on erittäin hyvin virtaava ja sen käyttöalue on tarkoitettu korkealle kierrosalueelle. Muun muassa optimoinnin tuloksena kasvanut venttiilin nosto ja sen myötä kasvava virtauksen määrä ovat johdonmukaisia optimointitulosten kanssa.



Kuva 50. Alkuperäisen ja optimoidun nokka-akselin vertailu.



## 10 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli luoda toimiva simulointimalli Ford Racing 302 -moottorista ja käydä ohjeistaen läpi simulointimallien rakentamisessa yleisesti huomioon otettavia asioita, jotta työtä voisi käyttää tietolähteenä Metropolia ammattikorkeakoulun tulevilla simulointiprojekteissa.

Työn tavoitteet saavutettiin pääosin hyvin. Moottorin simulointiprosessin aikana saavutettiin syvällisempi ymmärrys ohjelmiston toiminnasta ja simuloimisessa huomioon otettavista asioista. Myös simulointimallin osalta tavoitteet saavutettiin melko hyvin, koska mallista saatiin toimiva ja sen avulla saavutettiin suhteellisen tarkkoja tuloksia oikean moottorin toimintaan verrattuna.

Työn suurimpana haasteena oli kalibrointiin tarvittavien mittaus tietojen puutteellisuus, jolloin kunnollista simulointimallin kalibrointia ei voitu toteuttaa. Moottorin ja simulointimallin ainoa vertailupohja olivat suorituskyvyn arvot, jolloin eri osien yksilöllistä kalibrointia ei voitu myöskään suorittaa. Tämä johti ongelmiin tilanteissa joissa suorituskyvyn arvot eivät täsmänneet toisiaan, jolloin tuloksien epätarkkuutta aiheuttavia syiden löytäminen oli erittäin haastavaa ja hidasta.

Suurimpia haasteita tuottanut yksittäinen osa oli moottorin imusarja, jonka mallintaminen virtauksenjakokomponentiksi tuotti vaikeuksia. Imusarjan rakenteella oli suuri vaikutus simuloinnin tuloksiin, mutta sille tehtävää oikeaoppista kalibrointia ei voitu suorittaa, jolloin sen mallintamisessa jouduttiin käyttämään kokeellisia tuloksia ja oletuksia.

Todellisesta moottorista tehdyissä tehomittauksissa oli myös melko paljon hajontaa mittausten välillä. Mittauksessa ja kalibroinnissa kohdatut ongelmat lisäsivät virhemarginaalin suuruutta simulointituloksien ja mitattujen tuloksien välillä. Ottaen huomioon edellä mainitut asiat saavutettiin simuloinnin avulla todellista moottoria vastaava simulointimalli suhteellisen hyvällä tarkkuudella, jolloin mallia voidaan käyttää myös pohjana seuraaviin tutkimus- ja kehitystöihin.

Nokka-akselin optimoinnilla saavutettiin huomattavia parannuksia simulointimallin suorituskyvyyssä. Simuloinnin avulla saatuja tuloksia käytetään hyväksi hankittaessa moot-

toriin uutta nokka-akselia, mutta sen testaaminen käytännössä tapahtuu kuitenkin myöhempänä ajankohtana, jolloin vertailupohjaa simuloitujen ja mitattujen tulosten välillä ei saatu sisällytettyä tämän työn yhteydessä.

Tulevia simulointiprojekteja silmällä pitäen voidaan todeta, että käytettäessä Gem3D-työkalua, 3D-mallien liialliseen tarkkuuteen panostaminen on suorituskykyä analysoitaessa hieman turhaa. Luotaessa 3D-malleista ohjelman omia virtauskomponentteja ohjelma yksinkertaistaa monet monimutkaisemmat muodot kuten terävät kulmat ja muut pienit pinnanmuotojen muutokset. Osien pinnanmuotojen vaikutukset virtaukseen mallinnetaan eri kertoimien avulla käyttämällä niitä kuitenkin harkitusti, jotta tuloksia ei saavuteta ns. huijaamalla käyttämällä liioiteltuja kertoimia.

Simuloinnissa käytettävien osien valmiina saatuihin mitta-arvoihin on myös syytä suhtautua varauksella, koska joskus pienenkin virheen merkitys saattaa myöhemmin keräytyä vaikuttaen merkittävästi kokonaisuuteen. Myöskään luotettavalla tavalla tehtyjä mittauksia oikeasta moottorista ei käytännössä voi olla liikaa, koska ne helpottavat huomattavasti mallin rakentamisessa mahdollisesti kohdattavien vikatilanteiden syiden selvittämisessä sekä simulointimallin korreloimisessa ja kalibroimisessa todellisen moottorin kanssa.

Simulointiohjelmiston käytön aikana kohdatut haasteet ja ongelmakohdat saatiin pääosin selvitettyä, jolloin ohjelmiston käyttö seuraavissa simulointiprojekteissa on helpompaa. Tulevissa projekteissa vastaantulevat yleisimmät ongelmat ja virheet ovat tämän työn pohjalta helpommin vältettävissä.

**Lähteet**

- 1 GT-Power User's Manual. 2010. Gamma Technologies.